



# Melhoria do Sistema de Planeamento de Produção

**NUNO ANDRÉ GANDRA DIAS**

julho de 2019

# MELHORIA DO SISTEMA DE PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO

Nuno André Gandra Dias  
1120610

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica (MEM)



## MELHORIA DO SISTEMA DE PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO

Nuno André Gandra Dias  
1120610

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Manuel Pereira Lopes.

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



**Presidente**

Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Orientador**

Professor Doutor Manuel Joaquim Pereira Lopes  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Arguente**

Professora Doutora Carla Alexandra Soares Gerales  
Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança

## AGRADECIMENTOS

Quero, em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador, Professor Manuel Pereira Lopes por toda a ajuda, frontalidade e motivação desde o início.

Ao Manel e ao Paulo por todos os momentos partilhados ao longo do curso.

À empresa que me acolheu para a realização do estágio curricular e a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização do projeto.

Ao Francisco Pires e à Alexandra Mouta pela orientação e compreensão ao longo do meu estágio.

Aos colegas que participaram, juntamente comigo, no programa de estágios, pela união e apoio ao longo do projeto.

A toda a equipa do Planeamento, especialmente à Julieta, não só por todo o apoio e disponibilidade, como também pelo bom ambiente de trabalho. Não podia ter tido mais sorte na equipa.

Ao António, à Mariana, à Daniela e ao Moura por serem, mais do que amigos, uma família para mim há muitos anos.

Aos meus pais, irmãos e avós pelo apoio incondicional.

Por fim, à Sara, a pessoa que mais me apoiou nos últimos anos e a quem devo, efetivamente, um enorme obrigado.

## RESUMO

No contexto industrial atual, a capacidade de adaptação a uma realidade em mudança constante é vital para a diferenciação de uma organização. Este atributo torna-se ainda mais fulcral num ambiente *Make to Order*, na medida em que a exigência dos clientes, que procuram produtos entregues rapidamente, com qualidade, diversidade e baixo custo, é cada vez maior. As empresas devem, portanto, ser versáteis e eficientes simultaneamente.

A presente dissertação descreve o projeto realizado numa linha de transformação de blocos de cortiça, com o propósito de melhorar o sistema de planeamento existente. Esta linha, onde o tipo de implantação é *job-shop*, era caracterizada pela falta de critério no balanceamento das laminadoras, assim como na programação da produção do *bottleneck*. Além disso, a existência de diversas gamas operatórias e tempos de processamento desatualizados em sistema, contribuía para uma maior desorganização no processo de planeamento.

Neste sentido, o foco do projeto incidiu no desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão que permitisse aos utilizadores, seja o planeador ou o supervisor da área em questão, não só automatizar o processo de programação da produção, como também ter como *output* um sequenciamento otimizado face àquele que estava inicialmente implementado. Como tal, foi feito um mapeamento do processo produtivo, desde a análise dos equipamentos ao estudo das gamas operatórias existentes. De seguida foi desenvolvida uma ferramenta, em VBA-Excel, que possibilitasse a adaptação ao contexto real da linha, através da definição de determinados parâmetros por parte do utilizador, e a simplicidade de utilização, de forma a que pudesse, de facto, ajudar no processo de decisão. Por fim, o desenvolvimento de heurísticas com o objetivo de reduzir tempos de paragem dos equipamentos.

No final, foi concluído que o processo de programação da produção nesta linha através da ferramenta desenvolvida pode contribuir para a redução dos tempos até então despendidos pelo supervisor para a realização da mesma de forma manual. Por outro lado, o estudo realizado contribuiu para corrigir estruturas de produto e definir novos critérios de balanceamento na linha de produção.

## PALAVRAS CHAVE

Planeamento Programação e Controlo da Produção, Sistema Produtivo, *job-shop*, escalonamento, sequenciamento.





## ABSTRACT

In the current industrial context, the ability to adapt to a constantly changing reality is vital to the differentiation of an organization. This attribute becomes even more critical in a Make to Order environment, in that customers' requirements in delivery times, product quality and diversity and low cost are increasing. Therefore, companies must be versatile and efficient at the same time.

This dissertation describes the project that was carried out in a cork block transformation production line, where the goal was to improve the existing production planning system. This production line, which follows a job-shop model, was characterized by the lack of discretion in balancing production, as well as in the bottleneck production scheduling. In addition, the existence of different operative ranges and outdated system processing times contributed to a greater disorganization in the production planning process.

In this sense, the focus of the project was on the development of a decision support tool that allows users, either the planner or the supervisor, not only to automate the production scheduling process, but also to have as an output an optimized scheduling against the one that was initially implemented. As such, a production process mapping was done, from the analysis of the equipment to the study of the existing operative ranges. Next, a VBA-Excel tool was developed that would allow the adaptation to the actual context of the line, through the definition of certain parameters by the user, and the simplicity of use, so that it could actually help in the decision-making process. Finally, the development of heuristics in order to reduce equipment downtime

In the end, it was concluded that the production scheduling process in this line through the developed tool can contribute to the reduction of the times previously spent by the supervisor to carry out the same manually. On the other hand, the study contributed to correct product structures and to define new balancing criteria in the production line.

## KEYWORDS

Production Planning, Productive System, Job-shop, scheduling, sequencing



## LISTA DE ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

APA	Armazém de Produto Acabado
BD	Base de Dados
DJSP	<i>Dynamic Job-Shop Scheduling Problem</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
JSP	<i>Job-Shop Scheduling Problem</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
MEM-GI	Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Gestão Industrial
MOE	<i>Microsoft Office Excel</i>
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
MTO	<i>Make To Order</i>
OEE	<i>Overall Equipment Efficiency</i>
OF	Ordem de Fabrico
PCP	Planeamento e Controlo da Produção
PDP	Plano Diretor de Produção
PPA	Planeamento de Produção Agregada
PPCP	Planeamento Programação e Controlo da Produção
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
WIP	<i>Work In Progress</i>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – FASES PRINCIPAIS DO CICLO DE PRODUÇÃO (ADAPTADO DE ÁVILA & CAVACO, 2008).	25
FIGURA 2 – FASES DA FUNÇÃO PLANEAMENTO E CONTROLO DA PRODUÇÃO (ADAPTADO DE SILVA, 1994).	26
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DIFERENÇA ENTRE O TIPO DE CARREGAMENTO INFINITO (EM CIMA) E O TIPO DE CARREGAMENTO FINITO (EM BAIXO).	27
FIGURA 4 – DIAGRAMA DO FLUXO DE INFORMAÇÃO NUM SISTEMA DE FABRICO (ADAPTADO DE PINEDO, 2008).	29
FIGURA 5 – CLASSES DE COMPLEXIDADE (ADAPTADO DE BAKER & TRIETSCH, 2009; BŁAŻEWICZ ET AL., 2001; PEREIRA, 2003).	36
FIGURA 6 – RELAÇÕES ESTABELECIDAS ENTRE AS ÁREAS DE SERVIÇO DE APOIO AO CLIENTE, PLANEAMENTO E PRODUÇÃO DESDE O PROCESSO DE RECEÇÃO DE ENCOMENDA ATÉ AO FECHO DA ORDEM DE FABRICO.	43
FIGURA 7 – LAYOUT PARCIAL DA FÁBRICA QUE CONTÉM A LINHA DE PRODUÇÃO EM ESTUDO.	45
FIGURA 8 – RETIFICADORA.	46
FIGURA 9 – LAMINADORA: MESA COM BLOCOS (ESQUERDA) E CABEÇOTE (DIREITA).	46
FIGURA 10 – POSTO LAMINADORA COM LIXADORA.	48
FIGURA 11 – POSTO DE SERRAGEM.	48
FIGURA 12 – ZONA DA PALETIZAÇÃO NO CENTRO DE EMBALAGEM.	49
FIGURA 13 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO POR GAMAS OPERATÓRIAS. ESTÃO TAMBÉM REPRESENTADOS OS MODOS DE MOVIMENTAÇÃO DE PALETES ENTRE POSTO, ISTO É, EMPILHADOR OU CAMINHOS DE ROLOS.	52
FIGURA 14 – PRINCIPAIS MEDIDAS DE AUTOMATIZAÇÃO PARA O ESCALONAMENTO E SEQUENCIAMENTO.	60
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DO FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO.	61
FIGURA 16 – PARTE DO ALGORITMO QUE CORRESPONDE AO ESCALONAMENTO DAS OFS NA RETIFICADORA.	62
FIGURA 17 – PARTE DO ALGORITMO CORRESPONDENTE AO ESCALONAMENTO DE OFS QUE NÃO REQUEREM A OPERAÇÃO DE RETIFICAÇÃO.	63
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DA HEURÍSTICA DE BALANCEAMENTO DAS LAMINADORAS.	64
FIGURA 19 – DISPOSIÇÃO DO MENU INICIAL DA FERRAMENTA.	65
FIGURA 20 – DEFINIÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE CAPACIDADE DOS EQUIPAMENTOS.	66
FIGURA 21 – TABELA DEMONSTRATIVA DA GAMA OPERATÓRIA DE CADA OF.	66
FIGURA 22 – USERFORM PARA AJUSTAR O STOCK DE BLOCOS.	67
FIGURA 23 – USERFORM PARA SELECIONAR AS LAMINADORAS ATIVAS.	67
FIGURA 24 – SEPARADOR REFERENTE À GAMA OPERATÓRIA DAS OFS.	69
FIGURA 25 – PLANO DA RETIFICADORA.	69
FIGURA 26 – PLANO DA SERRA.	70
FIGURA 27 – PLANO DA LAMINADORA 12.	70
FIGURA 28 – PLANO DA LAMINADORA 8.	70

FIGURA 29 – PLANO DAS LAMINADORAS 1 E 3 (LAMINADORAS <i>STANDARD</i> ).	70
FIGURA 30 – PLANO DA LAMINADORA 7.	71
FIGURA 31 – PLANO DA LAMINADORA 13.	71
FIGURA 32 – PLANO DA LIXADORA.	71
FIGURA 33 – PLANO DA EMBALADORA.	71
FIGURA 34 – DIAGRAMA DE <i>GANTT</i> CORRESPONDENTE À OCUPAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.	71

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – EXEMPLOS DE REGRAS DE DESPACHO E O RESPETIVO MODO DE APLICAÇÃO.	39
TABELA 2 – INFORMAÇÃO ACERCA DAS CAPACIDADES, EM HORAS, DOS EQUIPAMENTOS	49
TABELA 3 – TEMPOS DE SETUP FIXOS E VARIÁVEIS DOS DIFERENTES EQUIPAMENTOS DA LINHA DE PRODUÇÃO.	50
TABELA 4 – DIMENSÕES DOS BLOCOS E RESPETIVA CLASSIFICAÇÃO.	51
TABELA 5 – PRODUÇÃO MÉDIA DIÁRIA POR EQUIPAMENTO AO LONGO DE TRÊS SEMANAS.	51
TABELA 6 – GAMAS OPERATÓRIAS DETALHADAS COM DADOS REFERENTES AOS ÚLTIMOS OITO MESES DE 2018. AS OPERAÇÕES QUE SÃO SEGUIDAS POR UM ASTERISCO SÃO REALIZADAS NUMA OUTRA LINHA DE PRODUÇÃO. A PRIMEIRA COLUNA CORRESPONDE À IDENTIFICAÇÃO DA GAMA OPERATÓRIA (GO); AS QUATRO COLUNAS SEGUINTE INDICAM AS OPERAÇÕES CONTIDAS NA GAMA OPERATÓRIA; AS ÚLTIMAS TRÊS REFEREM-SE AO NÚMERO DE BLOCOS, PERCENTAGEM CORRESPONDENTE E PERCENTAGEM ACUMULADA.	52
TABELA 7 – CLASSIFICAÇÃO DOS DIVERSOS PARÂMETROS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO EM ESTUDO.	53
TABELA 8 – PROCEDIMENTO A SEGUIR PARA A UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA.	65
TABELA 9 – COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO DE PLANEAMENTO MANUAL E O PROCESSO COM UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA.	72





# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1.	Contextualização .....	20
1.2.	Objetivos.....	20
1.3.	Estrutura da Dissertação.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	24
2.1.	Planeamento Programação e Controlo da Produção .....	24
2.2.	Programação da Produção.....	26
2.3.	Escalonamento (Scheduling).....	28
2.3.1.	Objetivos e Modelos.....	31
2.3.2.	Representação .....	31
2.3.3.	Complexidade Computacional .....	35
2.4.	Job-shop Scheduling .....	37
2.5.	Regras de Despacho .....	38
3.	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO .....	43
3.1.	Descrição do Processo de Tratamento de Encomendas.....	43
3.2.	Planeamento da Produção na Empresa .....	44
3.3.	Descrição do Equipamento .....	44
3.3.1.	Retificadora.....	45
3.3.2.	Laminadoras .....	46
3.3.3.	Laminadora - Lixadora .....	47
3.3.4.	Serra .....	48
3.3.5.	Embalagem .....	48
3.3.6.	Dados dos Equipamentos .....	49
3.4.	Produtos .....	51
3.5.	Processo Produtivo e Gamas Operatórias .....	51
3.6.	Classificação do Sistema Produtivo .....	53
3.7.	Levantamento de Problemas e Propostas de Melhoria .....	55

4.	FERRAMENTA DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO .....	59
4.1.	Descrição do Algoritmo .....	60
4.2.	Processo de Utilização da Ferramenta .....	64
4.3.	Exemplo do Funcionamento do Algoritmo .....	68
4.4.	Comparação de Métodos .....	72
5.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	75
5.1.	CONCLUSÕES .....	75
5.2.	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS .....	76
6.	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO .....	79

# INTRODUÇÃO

- 1.1. Contextualização
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Estrutura da Dissertação

## 1 INTRODUÇÃO

Dada a atual globalização e imprevisibilidade do mercado verifica-se uma crescente competitividade, sendo que, para uma organização, uma posição de destaque torna-se imprescindível para a sua sobrevivência. Para garantir a sua sustentabilidade, a inovação deve surgir não só no produto ou característica de um produto, mas sim de forma global, passando, entre outros, pelos sistemas de produção, onde a satisfação do cliente e a utilização eficiente dos seus recursos são os principais objetivos. É, portanto, vital procurar de forma continuada novos conceitos, processos, soluções de controlo e planeamento da produção, de forma a garantir um sistema produtivo atual, eficiente e eficaz, sem comprometer os seus objetivos.

A tipologia do sistema de produção condiciona a aplicação de determinadas melhorias, isto é, em sistemas mais complexos como é o caso do *job-shop*, onde existe uma grande variedade de produtos, a inovação torna-se mais exigente. Trata-se de uma tipologia comum em empresas que atuam no setor da produção por encomenda, sendo o cliente a definir as especificações desejadas.

### 1.1. Contextualização

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito da conclusão do Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Gestão Industrial (MEM-GI), incidindo no estágio curricular de contexto industrial realizado no departamento da Logística de uma empresa do setor da cortiça ao longo de, sensivelmente, 7 meses.

O projeto referente ao estágio passa pela melhoria do sistema de planeamento da produção numa linha através do desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão na programação da produção.

Nos subcapítulos que se seguem, é feita uma abordagem ao enquadramento, descrição dos objetivos e metodologia do projeto, passando também pela estrutura da dissertação.

### 1.2. Objetivos

Os objetivos do trabalho desenvolvido passam pela análise do funcionamento do planeamento de produção atual, levantamento de possíveis melhorias e desenvolvimento de uma aplicação que facilite a implementação do planeamento

diário, tendo como principal foco a adaptabilidade ao contexto da empresa e a automatização do processo. Dado que se trata de um trabalho contínuo e que os sistemas produtivos são altamente dinâmicos, a flexibilidade da aplicação, no que toca à sua suscetibilidade a alterações, é também um requisito, pelo que é proposta a realização da programação em *Visual Basic for Applications* (VBA).

### 1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro é constituído pela introdução da dissertação, abordando pontos como objetivos e enquadramento da mesma.

No segundo capítulo são apresentados conceitos teóricos referentes à revisão bibliográfica, onde são descritas as fontes científicas relevantes para a elaboração desta dissertação, isto é, temas relacionados com o planeamento de produção e escalonamento.

No terceiro capítulo é feita uma descrição e análise do funcionamento do planeamento da empresa, assim como a caracterização da linha de produção em estudo.

O quarto capítulo diz respeito à implementação de melhorias e respetiva análise, através da explicação do funcionamento da ferramenta desenvolvida.

Por último, no quinto capítulo, serão expostas as conclusões e algumas propostas de melhoria a implementar no futuro.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1. Planeamento Programação e Controlo da Produção
- 2.2. Programação da Produção
- 2.3. Escalonamento (Scheduling)
- 2.4. Job-shop Scheduling
- 2.5. Regras de Despacho



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é feita uma síntese dos conceitos relacionados com a área do planeamento e controlo da produção, assim como uma breve revisão bibliográfica a temas mais relevantes para a realização desta dissertação, nomeadamente o sequenciamento/ escalonamento (*scheduling*) – definições, propósito e métodos – e uma abordagem mais detalhada ao método das regras de despacho.

### *2.1. Planeamento Programação e Controlo da Produção*

A função Planeamento, Programação e Controlo da Produção (PPCP) ou, mais usualmente, Planeamento e Controlo da Produção (PCP) envolve duas atividades intimamente relacionadas entre si:

- Planeamento: visa definir no tempo os produtos que se vão realizar, nas quantidades e qualidade pretendidas;
- Controlo: tem como objetivo introduzir as correções adequadas, tendo em conta o desfasamento entre aquilo que foi produzido e o que foi planeado.

A fim de compreender a função do PCP, é necessário enquadrá-la no ciclo produtivo, sendo que este engloba processos desenvolvidos em diferentes departamentos. A Figura 1 mostra que o PCP antecede três tarefas, sendo elas o Planeamento e Programação da Produção, Lançamento das Ordens de Fabrico (OFs) e Controlo da Produção.

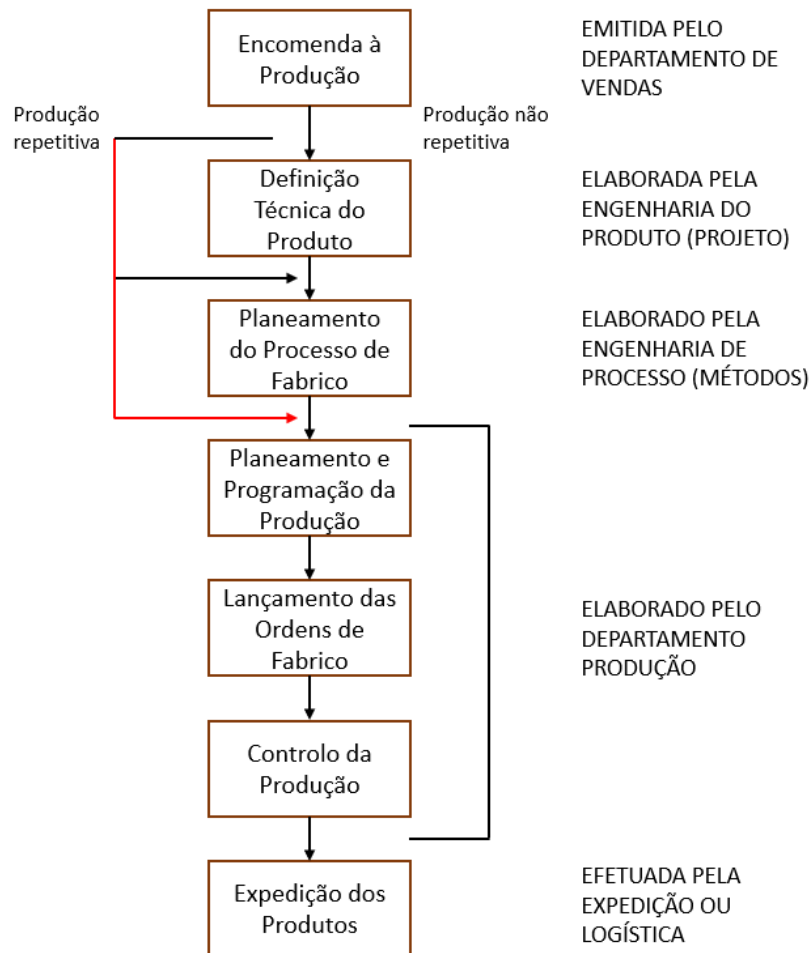


Figura 1 – Fases principais do ciclo de produção (adaptado de Ávila & Cavaco, 2008).

O PCP pode ser definido em quatro níveis – Figura 2. No primeiro nível integram-se, paralelamente, o planeamento da produção agregada (PPA) e planeamento agregado de capacidade/planeamento de recursos. Este nível do PCP reflete a estratégia da empresa em relação ao futuro, em que o objetivo é preservar uma capacidade competitiva assegurando a utilização eficaz dos recursos de produção. O planeamento diretor de produção (PDP) insere-se no nível seguinte e é usado essencialmente para o médio prazo. Os resultados deste planeamento são planos diretores de produção que indicam a quantidade a produzir de um produto específico num certo horizonte de tempo. É neste nível que ocorre a transformação das encomendas em ordens de produção. Paralelamente ao PDP tem-se o planeamento da capacidade crítica que tem como objetivo verificar a existência ou não de capacidade para satisfazer o que está estabelecido no PDP. No terceiro nível tem-se um conjunto de funções do PCP que têm como objetivo fazer o planeamento das necessidades materiais (MRP). O MRP determina planos, período a período, para todos os componentes e matérias-primas necessárias. No último nível tem-se a monitorização e controlo da produção (Silva, 1994).

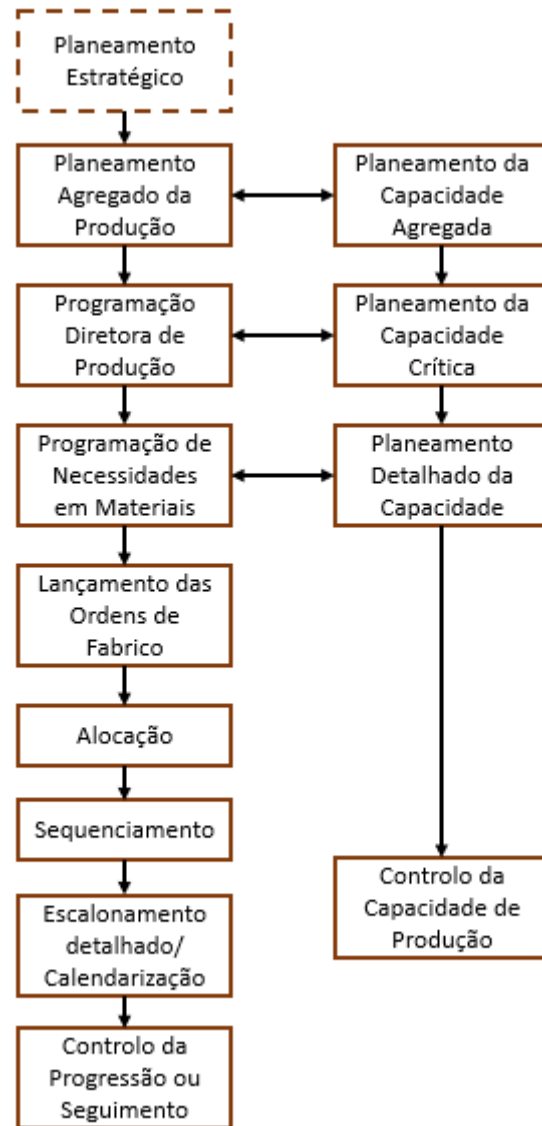


Figura 2 - Fases da função Planeamento e Controlo da Produção (adaptado de Silva, 1994).

## 2.2. Programação da Produção

Apesar de muitas vezes serem referidos como sinónimos, os conceitos de “planeamento” e “programação” da produção diferem num ponto, isto é, no horizonte temporal. Enquanto que o primeiro termo visa o médio e longo prazo – próximos meses ou mesmo próximos anos – o segundo visa o curto prazo – próximas semanas (Ávila & Cavaco, 2008).

Olhando para a Figura 2, a programação finita da produção diz respeito às últimas cinco etapas: lançamento das ordens de fabrico, alocação, sequenciamento, escalonamento e controlo. Estes passos serão muito brevemente abordados neste subcapítulo.

### Lançamento

Preconiza a libertação das ordens de fabrico para produção, no pressuposto de que existem meios necessários para as processar, sendo estes matérias primas e componentes, ferramentas e máquinas, desenhos, entre outros.

A ordem mais indicada a seguir entre o lançamento e sequenciação depende do tipo de sistema produtivo em causa.

### **Alocação/ Carregamento**

Consiste em alocar o trabalho ou ordens de fabrico aos centros de trabalho onde deverão ser processados. A alocação torna-se complexa quando existem vários postos de trabalho capazes de desempenhar o mesmo trabalho e há vários a realizar.

Existem dois tipos de carregamento (Figura 3):

- Carregamento Infinito: o trabalho é afetado aos centros de trabalho sem considerar as restrições de capacidade.
- Carregamento Finito: o trabalho é afetado aos centros de trabalho sem que as capacidades sejam excedidas.

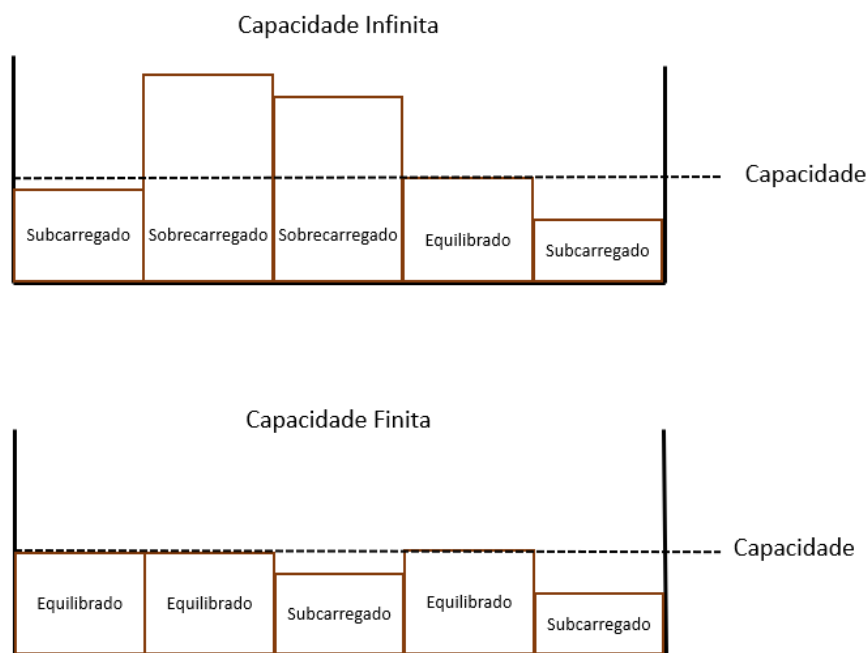


Figura 3 – Representação gráfica da diferença entre o tipo de carregamento infinito (em cima) e o tipo de carregamento finito (em baixo).

### **Sequenciamento**

Corresponde à prioridade dos trabalhos em cada centro de trabalho quando se processa o carregamento infinito. Para o caso do carregamento finito, o carregamento e sequenciamento são efetuados em simultâneo.

### **Escalonamento**

O objetivo principal do escalonamento é planejar a sequência de trabalho de

modo que a produção possa ser sistematicamente organizada, de forma a possibilitar o cumprimento das datas de entrega e produzir todos os produtos planeados.

### **Controlo**

Esta etapa corresponde à análise contínua ao processo, de forma a que seja possível identificar eventuais anomalias, corrigir problemas e melhorar a programação da produção.

### **2.3. Escalonamento (*Scheduling*)**

O escalonamento (*scheduling*) é um processo de decisão utilizado de forma regular em indústrias de produção e serviços e consiste em submeter os recursos limitados às tarefas ao longo do tempo (Pinedo, 2008). O estudo e investigação relativos a este assunto tem evoluído de forma significativa ao longo dos últimos anos, consistindo num tema de literatura relevante com métodos desde regras de prioridade de cariz rudimentar a técnicas de elevado grau de sofisticação como algoritmos de otimização combinatória (*branch and bound*) e heurísticas baseadas em pontos de estrangulamento dos sistemas produtivos (*bottlenecks*).

Neste ambiente, as encomendas são lançadas para fabrico, convertidas em tarefas e devem respeitar a sua data de entrega. Estas tarefas ou trabalhos são processadas por máquinas nos vários estágios de produção, segundo uma sequência pré-estabelecida, denominada por gama operatória. Se a este trabalho estiver associado um nível de prioridade, não será necessário esperar pela conclusão de outros trabalhos para iniciar o seu processamento.

Para manter a eficiência e o controlo das operações, é essencial um escalonamento detalhado, onde é necessário existir um grande nível de interação entre esta função e outras, de igual forma importantes, numa organização. O escalonamento poderá ser afetado pelo planeamento da produção, responsável por decisões referentes a níveis de inventário, previsões, e recursos necessários para a produção, por eventos inesperados no *shop floor*, tais como avarias nas máquinas ou processos mais demorados. Na Figura 4 é demonstrado o fluxo de informação num sistema de produção.

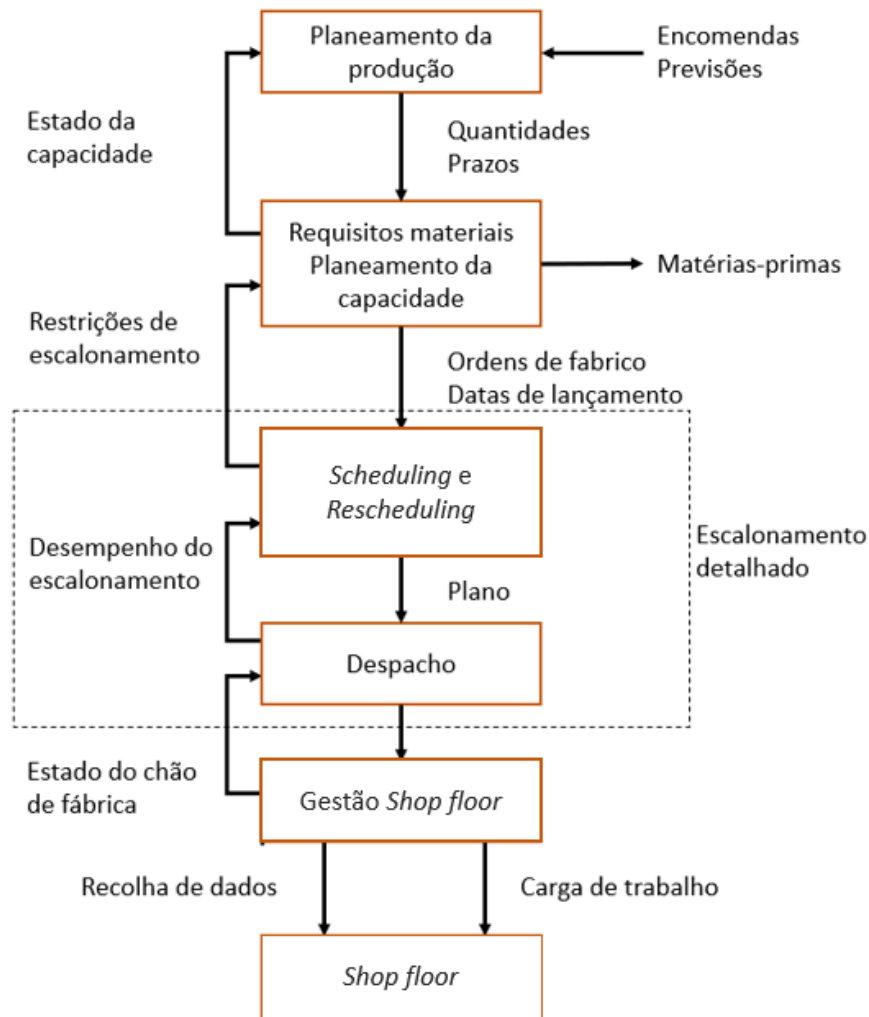


Figura 4 – Diagrama do fluxo de informação num sistema de fabrico (adaptado de Pinedo, 2008).

A teoria do escalonamento visa a resolução de problemas em unidades produtivas, pelo que, para caracterizar os problemas é utilizada uma terminologia idêntica à utilizada numa fábrica. Os recursos correspondem, geralmente, a máquinas, as atividades são denominadas por tarefas e em problemas onde as tarefas são executadas em várias máquinas, estas podem ser divididas em operações. Por fim, o ambiente do problema de escalonamento é, habitualmente, designado por oficina. Assim para caracterizar um problema de escalonamento, é necessário conhecer as características dos seus elementos, como:

- **Máquina** – É um recurso técnico ou humano necessário para a execução de uma tarefa, disponível em quantidade limitada, com uma determinada capacidade. O recurso é renovável se ficar novamente disponível uma vez concluída a tarefa. Se o recurso não for renovável é um recurso consumível. Os recursos serão disjuntivos, se apenas puderem ser utilizados numa tarefa de cada vez, ou cumulativos, se puderem ser partilhados por várias tarefas simultaneamente, respeitando a sua capacidade.

- Tarefa – É uma atividade de trabalho localizada no tempo, onde é conhecido o momento onde pode começar a ser executada e o fim da sua execução. É caracterizada pela sua duração e pelos recursos necessários para ser executada. Pode ser considerado que a intensidade no consumo de recursos é constante durante a sua execução.
- Operação – É uma parte de uma tarefa que apenas utiliza uma única máquina, pode ser uma operação de preparação ou uma operação de produção. Deste modo, qualquer tarefa que necessite de ser executada por várias máquinas, antes da sua conclusão, pode ser dividida em operações onde apenas utilizam um recurso.
- Oficina – Local onde estão dispostas as máquinas afetas à produção. As máquinas podem estar dispostas em linha de fabrico, célula de fabrico ou oficina de fabrico. A maneira como as máquinas estão dispostas vai condicionar a circulação das tarefas na oficina, com todas as operações a sucederem em rotas pré-definidas. Uma vez conhecidas as características das máquinas, tarefas e operações, é possível melhor definir o problema de escalonamento (Baker & Trietsch, 2009; Lopez & Roubellat, 2008).

Segundo Pinedo & Hadavi (1992) existem quatro conceitos fundamentais no escalonamento: tempo, recursos, tarefas e objetivos. O tempo pode ser especificado ou flutuante, como parte de uma sequência de eventos. Os recursos e as tarefas podem tomar muitas formas, por exemplo, máquinas numa oficina, pistas de aterragem num aeroporto, recursos humanos numa área de construção. As tarefas poderão ser operações num sistema de produção, descolagens e aterragens num aeroporto, fases de construção. A cada tarefa poderá estar associado um nível de prioridade, um tempo de inicialização e uma data de conclusão. Os objetivos, de igual forma, são variados. Reduzir o número total de tarefas em atraso, ou o tempo total de execução, são exemplos de objetivos.

Pinedo & Hadavi (1992) afirmam que, em várias instalações de produção e montagem, cada tarefa tem que ser sujeita a uma série de operações, e que muitas vezes essas operações têm que ser realizadas para todas as tarefas e na mesma ordem de execução. Neste caso pode dizer-se que todas as tarefas têm que seguir a mesma rota. É então assumido que as máquinas estão colocadas em série, e o ambiente de trabalho envolvente é referenciado como *flow-shop*.

Quando as rotas são fixas, mas não são necessariamente as mesmas para cada tarefa, o modelo é denominado *job-shop* (Pinedo & Hadavi, 1992). Este modelo tem a vantagem de admitir um fenómeno, comum no mundo real, conhecido por recirculação, isto é, quando uma tarefa tem que passar pela mesma máquina mais de uma vez antes de o processo ser completado.

Dado o sistema real estudado ao longo deste trabalho, serão abordadas diferentes implantações, sendo depois abordada de forma mais detalhada aquela que melhor o identifica.

### 2.3.1. Objetivos e Modelos

Por vezes, medir o desempenho das decisões de escalonamento é um processo complexo. Os custos associados à forma como as operações vão ser executadas, são difíceis de identificar ou quantificar. Assim, os três objetivos mais comuns num problema de escalonamento são:

- Tempo de execução – tempo necessário para o processamento de uma tarefa;
- Pontualidade – diferença entre o fim da execução de uma tarefa e o seu prazo de conclusão esperado;
- Produtividade – quantidade de trabalho concluído durante um determinado período de tempo

Enquanto o tempo de execução e a pontualidade medem o desempenho de uma única tarefa, a produtividade pode ser utilizada para medir o desempenho de uma série de tarefas (Baker & Trietsch, 2009). Podem também existir outros tipos de objetivos, mais complexos de quantificar e/ou modelar. Custos associados à imagem da organização, ou custos referentes ao descontentamento dos funcionários, são exemplos de indicadores que dificilmente se traduzem numa expressão matemática. Para caracterizar os principais modelos de escalonamento, são usadas as especificidades das tarefas e a forma como os recursos estão dispostos. Em modelos onde apenas exista uma máquina, é natural que as tarefas apenas tenham uma única operação, enquanto que em modelos onde existam várias máquinas é normal que as tarefas possam ser divididas em várias operações distintas.

Os modelos onde as tarefas a escalonar não mudam com o passar do tempo, são classificados como estáticos; os modelos onde novas tarefas podem surgir são designados por modelos dinâmicos. Embora os modelos dinâmicos possam parecer mais próximos da realidade, os modelos estáticos, mais simples, podem ser utilizados para simplificar os modelos dinâmicos, mais complexos (Baker & Trietsch, 2009).

Em modelos onde as condições são assumidas como constantes, são chamados de modelos determinísticos, enquanto aqueles onde existe incerteza, com uma probabilidade associada, podem ser designados por modelos estocásticos (Baker & Trietsch, 2009).

### 2.3.2. Representação

A evolução dos estudos relativos à temática do escalonamento da produção levou a um aumento da variedade de modelos existentes, algo que despoletou a necessidade de desenvolver novos sistemas que os representassem de forma concisa. Apesar de não



haver uma representação específica para todos os problemas de escalonamento, as soluções existentes permitem caracterizar os principais.

Um exemplo deste tipo de representações é a desenvolvida por Pinedo (2008), na qual o número total de trabalhos é designado pela letra  $n$  e o número total de máquinas por  $m$ . Um trabalho é designado por  $j$  e uma dada máquina por  $i$ . Se um trabalho necessitar de várias etapas de transformação ou operações, o par  $(i, j)$  representa, desta forma, a etapa de transformação do trabalho  $j$  na máquina  $i$ . A cada trabalho  $j$  poderá estar associada a seguinte informação:

- Tempo de processamento ( $p_{ij}$ ) – tempo de processamento do trabalho  $j$  na máquina  $i$ .
- Data de lançamento ( $r_j$ ) – data em que dada a ordem de iniciar o processamento do trabalho  $j$ .
- Data de entrega ( $d_j$ ) – data em que a entrega do trabalho  $j$  foi acordada com o cliente.
- Peso ( $w_j$ ) – Representa a importância da tarefa  $j$ , quando comparado com as outras tarefas do sistema. Uma tarefa com um peso superior deverá ter prioridade sobre tarefas com pesos inferiores. Se não existirem pesos é porque todas as tarefas têm uma prioridade semelhante.

Segundo Pinedo (2008), para definir um dado problema de escalonamento existem três variáveis que serão necessárias identificar previamente:  $\alpha$ ;  $\beta$ ; e  $\gamma$ .

- A variável  $\alpha$  identifica o ambiente industrial.
- O  $\beta$  fornece detalhes das características e restrições do processamento e poderá assumir múltiplas entradas.
- O campo  $\gamma$  representa o objetivo proposto.

### Tipo de Implantação

Para  $\alpha$ , são possíveis as seguintes alternativas:

- Máquina Única (1) - Corresponde ao tipo de implantação mais simples e por isso é muito utilizado para resolver sub-problemas de implementações mais complexas.
- Máquinas Idênticas em Paralelo ( $P_m$ ) - Quando existem  $m$  máquinas idênticas, em paralelo. Representa o caso da tarefa  $j$  apenas necessitar de ser processada numa das  $m$  máquinas, todas elas com características idênticas.
- Máquinas com Velocidades Diferentes em Paralelo ( $Q_m$ ) - Representa o caso da tarefa  $j$  apenas necessitar de ser processada numa das  $m$  máquinas, com uma velocidade  $v_i$ .

- Máquinas Diferentes em Paralelo ( $R_m$ ) - Quando existem  $m$  máquinas com velocidades dependentes da tarefa que é afeta. Representa o caso da tarefa  $j$  apenas necessitar de ser processada numa das  $m$  máquinas, com uma velocidade  $v_{ij}$ .
- Linha de Fabrico ( $F_m$ ) - No caso de existirem  $m$  máquinas em série. Cada tarefa necessita de ser processada em cada uma das  $m$  máquinas na mesma sequência. Assim, após ser processada na máquina  $m$ , a tarefa transita para máquina  $m+1$ .
- Linha de Fabrico Flexível ( $FF_c$ ) - No caso de existirem  $c$  centros, cada um com  $m$  máquinas idênticas. Cada tarefa necessita de ser processada em cada um dos níveis por uma das  $m$  máquinas disponíveis.
- Oficina de Fabrico ( $J_m$ ) - Para o caso de existirem  $m$  máquinas e em que cada tarefa percorre uma rota específica ao longo do sistema produtivo. Existem oficinas de fabrico onde cada tarefa apenas visita cada máquina uma única vez e aquelas onde cada tarefa pode visitar a mesma máquina mais que uma vez.
- Oficina de Fabrico Flexível ( $FJ_c$ ) - Para o caso de existirem  $c$  centros de trabalho, cada um com  $m$  máquinas idênticas. Cada tarefa necessita de ser processada em cada um dos centros de trabalho. Existem oficinas de fabrico onde cada tarefa apenas visita cada centro de trabalho uma única vez.
- Oficina Aberta ( $O_m$ ) - Para o caso de existirem  $m$  máquinas e cada tarefa ter que ser processada por cada uma. O tempo de processamento de certas tarefas em algumas máquinas pode, no entanto, ser zero.

Assim, para preencher o campo  $\alpha$ , é necessário conhecer a disposição dos recursos produtivos, procedendo para uma análise mais detalhada (Pinedo, 2008).

### Restrições do Processo

O campo  $\beta$  poderá assumir as seguintes entradas:

- Data lançamento ( $r_j$ ), se este campo for referenciado, o trabalho  $j$  não pode ser iniciado antes da mesma. Caso contrário, o seu processamento poderá ser iniciado a qualquer altura.
- Tempos de preparação dependentes da sequência (*Sequence dependent setup times* -  $s_{jk}$ ). O  $s_{jk}$  representa tempos de preparação entre os trabalhos  $j$  e  $k$ ; sendo  $s_{0k}$  o tempo de setup para o trabalho  $k$ , se este for o primeiro na sequência; e  $s_{j0}$  o tempo de limpeza (*clean up time*) depois do trabalho  $j$ , sendo este o último da sequência.

- Interrupções (*Preemptions - prmp*), implica que não é necessário manter um trabalho numa máquina até à sua conclusão. É possível interromper o processamento de um trabalho a qualquer altura e colocar outro para iniciar o processamento.
- Restrições de precedência (*Precedence constrains - prec*), indicia que é necessário acabar um dado trabalho  $j$ , para que outro possa ser iniciado. A esta sequência é dada o nome de *chains (intree / outtree)*. Se cada trabalho tem, no máximo, um sucessor, as restrições são referidas como *intree*. Se cada trabalho tem, no máximo, um antecessor, as restrições são referidas como *outtree*.
- Paragens (*Breakdowns - brkdwn*), significa que uma das máquinas não está constantemente disponível. São períodos fixos (tempos de manutenção, mudança de turnos).
- Restrições das Máquinas (*Machine eligibilite restrictions - Mj*), este parâmetro é referenciado quando nem todas as máquinas são capazes de processar o trabalho  $j$ .
- Recirculação (*Recirculation - recrc*), ocorre quando um trabalho necessita de passar mais do que uma vez pela mesma máquina.

Assim, para preencher o campo  $\beta$ , é necessário conhecer as especificidades do problema de escalonamento que irá ser tratado. Ao contrário do campo  $\alpha$ , o campo  $\beta$  pode conter mais do que uma entrada, se o problema estiver sujeito a várias restrições; da mesma maneira o campo  $\beta$  pode encontrar-se vazio, se o problema não apresentar nenhuma das características descritas (Pinedo, 2008).

### Funções Objetivo

Os objetivos ( $\gamma$ ) são alcançados segundo determinados critérios, sendo o problema traduzido num problema de otimização (Reis, 2006).

A cada critério está associado uma função objectivo que terá um valor, para cada programa. O melhor programa será o que tem o melhor valor da função objectivo.

Segundo Rinnooy Kan (1976) os critérios podem ter a seguinte classificação:

- Critérios baseados nos tempos de fim – o objetivo a minimizar vem em função do tempo de conclusão do trabalho. Por exemplo:

*Makespan* – Tempo de conclusão do trabalho ( $C_{max}$ )

$$C_{max} = \max\{C_j\}$$

Tempo médio de espera ( $W_{med}$ )

$$W_{med} = \frac{(\sum_{j=1,n} w_j)}{n}$$

- Critérios baseados nas datas limite – baseiam-se nas datas entrega e são medidas de atrasos, a minimizar. Seguem-se alguns exemplos:

Atraso relativo máximo – O maior atraso relativo ( $L_{max}$ )

$$L_{max} = \max\{L_j\}$$

Atraso absoluto médio – Média dos atrasos absolutos ( $T_{med}$ )

$$T_{med} = \frac{(\sum_{j=1,n} T_j)}{n}$$

- Critérios baseados em custo e utilização – estes têm em conta custos de posse (existências) e a utilização dos recursos. Por exemplo:

Número médio de processos em curso ( $N_p$ ), em espera ( $N_e$ ) ou acabados ( $N_f$ )

Utilização média ( $U_{med}$ )

$$U_{med} = \frac{(\sum_{j=1,n} \sum_{i=1,k_j} p_i)}{(m * C_{max})}$$

### 2.3.3. Complexidade Computacional

No que diz respeito à dificuldade de resolução, os problemas de escalonamento são classificados de acordo com a teoria de complexidade computacional. O esforço necessário para resolver um algoritmo é, geralmente, uma função dependente da dimensão do problema ( $n$ ), chamada de função de complexidade. Para funções de complexidade de natureza polinomial, os algoritmos são designados por algoritmos polinomiais ou de classe P, quando a função de complexidade não pode ser descrita por uma função polinomial, então são designados por algoritmos não-polinomiais, ou de classe NP. Os problemas de escalonamento para os quais não são conhecidos algoritmos polinomiais, são de difícil resolução, devido a sua complexidade exponencial (Pereira, 2003). Por exemplo, dois modelos matemáticos com funções de complexidade  $k$  (Polinomial) e  $3^k$  (Não-Polinomial), necessitam de um esforço computacional muito diferente. Se  $k = 60$  e considerando cada operação de computação a demorar 1  $\mu$ s, o

primeiro algoritmo pode ser resolvido em 60  $\mu$ s, enquanto o segundo irá demorar  $1.3 \times 10^{13}$  séculos. Essa disparidade aumenta com o aumento de  $k$ , na razão da função de complexidade. No entanto, nem todos os problemas de escalonamento têm as mesmas características. Entre os problemas de pesquisa existem duas subclasses de problemas:

- Problemas de Otimização, problemas que procuram a melhor solução para um problema sob determinadas condições;
- Problemas de Decisão, problemas que devem determinar se uma solução é ou não aceite como solução do problema.

Entre os problemas de escalonamento para os quais não são conhecidos algoritmos polinomiais, existem duas classes particulares. Os problemas *NP-completo*, que incluem muitos problemas de decisão de natureza combinatória, são equivalentes entre si. Isto é, se for encontrado um algoritmo polinomial capaz de resolver um destes problemas, então todos os outros problemas de decisão *NP-completo*, também podem ser resolvidos através algoritmos polinomiais. Os problemas *NP-difícil*, são problemas de otimização em que o problema de decisão equivalente é *NP-completo*. Uma vez que os problemas de otimização e os problemas de decisão são computacionalmente equivalentes, os problemas *NP-difícil*, são tão difíceis como os problemas *NP-completo* (Błażewicz, Ecker, Pesch, Schmidt, & Węglarz, 2001).

Os problemas *NP-difícil* são por isso problemas de otimização para os quais não são conhecidos algoritmos eficientes de resolução. Um algoritmo é considerado eficiente se a sua complexidade temporal crescer de forma polinomial e não de forma exponencial com a dimensão do problema, isto é, permite a obtenção de soluções em tempo útil (Pereira, 2003).

Na Figura 5 é demonstrado um esquema onde é possível ver os problemas de natureza polinomial, não polinomial, os problemas *NP-completo* (*NP-complete*) e os *NP-difícil* (*NP-hard*).

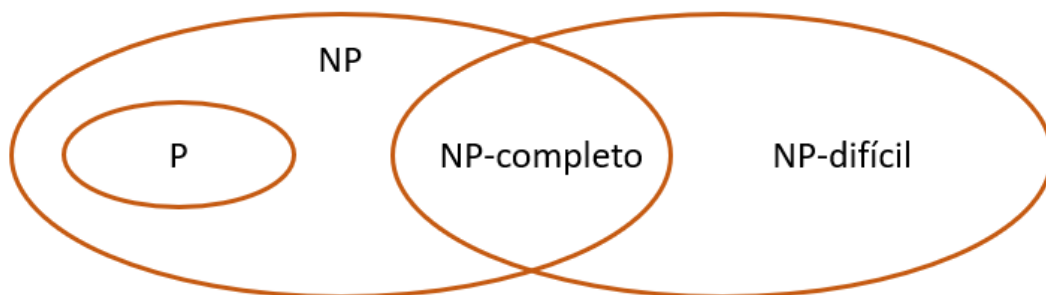


Figura 5 – Classes de complexidade (adaptado de Baker & Trietsch, 2009; Błażewicz et al., 2001; Pereira, 2003).

## 2.4. Job-shop Scheduling

O *Job-Shop Scheduling Problem (JSP)*, tem sido extensivamente estudado nas últimas décadas. O JSP clássico é, geralmente, definido da seguinte forma: existem  $n$  trabalhos, cada um com uma gama operatória específica, que devem ser processados em  $m$  máquinas ou postos de trabalho dentro de um intervalo de tempo, seguindo algum tipo de ordem (precedências), e deve ser feito um sequenciamento de forma a atingir um objetivo, seja este a minimização de uma ou várias medidas ou um nível de performance.

O problema de programação em *job-shop* é classificado por Garey et al. (Garey, Johnson, & Sethi, 1976) como *NP-difícil*. Esta designação indica que não são conhecidos algoritmos eficientes para a resolução destes problemas devido à sua complexidade exponencial. Consequentemente, os métodos usuais de sequenciação incluem:

- Gráficos – método manual empírico;
- Regras de prioridade;
- Métodos de otimização com solução ótima (apenas para pequenos problemas –  $n$  trabalhos que tem de ser processados através de dois centros de trabalho): programação linear e não linear;
- Métodos de otimização (para grandes problemas –  $n$  trabalhos que tem de ser processados em mais de dois centros de trabalho): meta-heurísticas;
- Simulação.

Nas últimas décadas foram desenvolvidos diversos métodos heurísticos baseados na abordagem *shifting bottleneck* (Adams, Balas, & Zawack, 1988; Balas, Lenstra, & Vazacopoulos, 1995) ou em estratégias de solução especiais como *simulated annealing* (van Laarhoven, Aarts, & Lenstra, 1992), *tabu search* (Dell’Amico & Trubian, 1993) e algoritmos genéticos (Bierwirth, 1995) capazes de resolver problemas de maior dimensão, garantindo tempos de execução de poucos minutos.

Em exemplos clássicos, trata-se de um problema estático, em que todas as informações relativas aos  $n$  trabalhos são previamente conhecidas e todas as operações relativas a estes trabalhos devem ser realizadas numa ordem específica, sem a necessidade de considerar o intervalo de tempo entre a conclusão de uma operação e o início de outra (Cheng, Gen, & Tsujimura, 1996; Shakhlevich, Sotskov, & Werner, 2000). No entanto, dado o funcionamento e a imprevisibilidade dos sistemas produtivos reais, estas condições raramente são estáveis, principalmente quando se trata de ambientes *Make to Order*, em que a chegada de encomendas segue um modelo intermitente. Neste caso refere-se ao problema acrescentando a componente dinâmica, ou seja, *dynamic job-shop scheduling problem (DJSP)* (Qiu & Lau, 2013; Ramasesh, 1990).

A chegada contínua de ordens de fabrico resulta na desatualização do escalonamento, sendo que, além deste fator, existem outros problemas impossíveis de controlar, tais como avarias nos equipamentos, desvios nos tempos de preparação ou mesmo falta de mão de obra (devido a doença, por exemplo). Uma possível solução seria a

reprogramação da produção, no entanto, isso seria algo que poderia, através da alteração contínua dos planos, contribuir para um planeamento de menor eficiência. Como tal, com o intuito de reduzir o impacto destas oscilações, criam-se zonas de armazenamento temporário de trabalho em processamento, denominadas por *buffers*. Nestas condições, as regras de prioridade tem sido alvo de grande atenção. Estas definem um sistema de prioridade, segundo um determinado critério, definindo assim a ordem pela qual os trabalhos devem ser processados. Os trabalhos ficam armazenados em filas de espera, onde aguardam o início de processamento. Este procedimento, no entanto, pode conduzir ao aumento dos tempos de espera nas filas e, consequentemente, ao aumento dos tempos de percurso (*flow time*).

Pelas razões de complexidade e variabilidade referidas, o JSP é muitas vezes resolvido satisfatoriamente de forma empírica, recorrendo a regras de prioridade ou despacho (*dispatching rules*). São regras bastante antigas e utilizadas devido à fácil aplicação e baixo tempo de processamento, tendo os primeiros trabalhos sido desenvolvidos por Jackson (1955), Smith (1956) e Giffler & Thompson (1960).

## 2.5. Regras de Despacho

As regras de despacho (*dispatching rules*) referem-se à combinação de uma ou mais regras de prioridade, assim como à combinação de uma ou mais regras heurísticas (Gere, 1966). Regras de despacho correspondem a casos específicos de regras de prioridade, na medida em que são usadas para atribuir tarefas a máquinas (Haupt, 1989).

Embora o ambiente dos sistemas de produção reais seja dinâmico, ou seja, a realização das tarefas é regularmente afetada por perturbações estocásticas, a utilização deste método é válida, tendo em conta os baixos tempos de execução computacional e as soluções não ótimas, mas satisfatórias.

As regras de despacho podem ser classificadas em diferentes categorias, de acordo com os seus atributos. Em termos de dependência temporal, podem ser categorizadas em regras estáticas ou dinâmicas. Relativamente às características estruturais, podem ser divididas em regras de prioridade simples, combinações de regras de despacho, regras ponderadas e regras heurísticas (Tay & Ho, 2008). Regras de prioridade simples baseiam-se numa única função objetivo e, geralmente, envolvem um único parâmetro, como o tempo de processamento, data de entrega ou número de operações. *Shortest Processing Time* (SPT) ou *Earliest Due Date* (EDD) são exemplos simples deste tipo de regras. Nenhuma regra de prioridade simples obtém um bom desempenho em todos os critérios relevantes (*flow time* e *tardiness*, por exemplo) de forma simultânea. Com o intuito de superar esta limitação, foram estudadas regras de despacho combinadas. Os resultados indicam que a combinação de regras apresenta uma maior eficiência quando comparada com as regras simples, a partir do momento em que a escala do problema aumenta, isto é, quando o número de máquinas aumenta.

Regras ponderadas correspondem à combinação linear de regras de prioridade simples com pesos atribuídos, de forma a que seja possível priorizar determinados critérios.

Já as regras heurísticas dependem da configuração do sistema. São regras que se usam em conjunto com as anteriores, sejam regras de prioridade simples, combinação de regras ou regras ponderadas. Por exemplo, a heurística pode usar o conhecimento humano, como inserir uma operação num intervalo de tempo inativo por inspeção visual do plano.

Apesar do número de regras de despacho continuar a aumentar, a grande maioria das novas regras são propostas através da modificação de regras já existentes, tais como a combinação e truncagem (Baker & Bertrand, 1982), ou sugestão de regras, especificando uma medida de desempenho ou ambiente de escalonamento específico (Chen & Matis, 2013).

Na Tabela 1 são enumeradas e descritas algumas das mais conhecidas e utilizadas regras de prioridade, das quais resultam regras de despacho.

Tabela 1 – Exemplos de regras de despacho e o respetivo modo de aplicação.

Regra	Descrição
Aleatória	Seleciona aleatoriamente a operação para a máquina considerada.
Earliest Due Date (EDD)	Prioriza as operações por ordem crescente das datas de entrega.
First Come First Served (FCFS)	Prioriza a primeira operação da fila de espera da máquina
Largest Number of Remaining Operations (LNRO)	Prioriza a operação com maior número de operações subsequentes.
Longest Operation Successor (LOS)	Prioriza a operação com maior tempo de processamento da operação subsequente.
Longest Operation Time (LOT)	Prioriza a operação com maior tempo de processamento na máquina considerada.
Longest Processing Time (LPT)	Prioriza a OP com maior tempo de processamento.
Longest Remaining Processing Time (LRPT)	Prioriza a operação com maior tempo restante de processamento da OP.
Least Work Remaining (LWKR)	Prioriza a OP com o menor valor da soma das durações das operações por realizar.
Minimum Slack (MS)	Prioriza a OP cujo tempo de folga até à data de entrega é menor.



Most Work Remaining (MWKR)	Prioriza a OP com o maior valor da soma das durações das operações por realizar.
Preferred Customer Order (PCO)	A ordem de produção (OP) de um cliente considerado prioritário é processada primeiro.
Smallest Number of Remaining Operations (SNRO)	Prioriza a operação com menor número de operações subsequentes.
Shortest Operation Time (SOT)	Prioriza a operação com menor tempo de processamento na máquina considerada.
Shortest Processing Time (SPT)	Prioriza a OP com menor tempo de processamento.
Shortest Remaining Processing Time (SRPT)	Prioriza a operação com o menor tempo restante de processamento da OP.

# DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO

- 3.1. Descrição do Processo de Tratamento de Encomendas
- 3.2. Planeamento da Produção na Empresa
- 3.3. Descrição do Equipamento
- 3.4. Produtos
- 3.5. Processo Produtivo e Gamas Operatórias
- 3.6. Classificação do Sistema Produtivo
- 3.7. Levantamento de Problemas e Propostas de Melhoria



### 3. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO

Neste capítulo é feito um resumo do sistema produtivo, a partir do qual se podem tirar conclusões relativamente aos problemas detetados e à forma como os mesmos devem ser abordados. Garantir uma uniformização da carga de trabalho do operador para evitar quer sobrecargas quer períodos não produtivos no decorrer do turno é fulcral para o bom funcionamento da linha. Para tal, também deve ser feita uma correta definição de características básicas como a identificação do número de postos de trabalho ou a forma como as operações se distribuem pelos mesmos.

#### 3.1. Descrição do Processo de Tratamento de Encomendas

De forma resumida, o processo desde a receção da encomenda à conclusão da OF é ilustrado na Figura 6, onde é possível entender também as relações estabelecidas entre as três áreas mais relevantes para este projeto, isto é, o Serviço de Apoio ao cliente, o Planeamento e a Produção.

Um dos maiores problemas existentes, que é abordado mais à frente, incide na ausência de informação relativa ao estado da produção em tempo real, o que provoca numerosas falhas de comunicação.

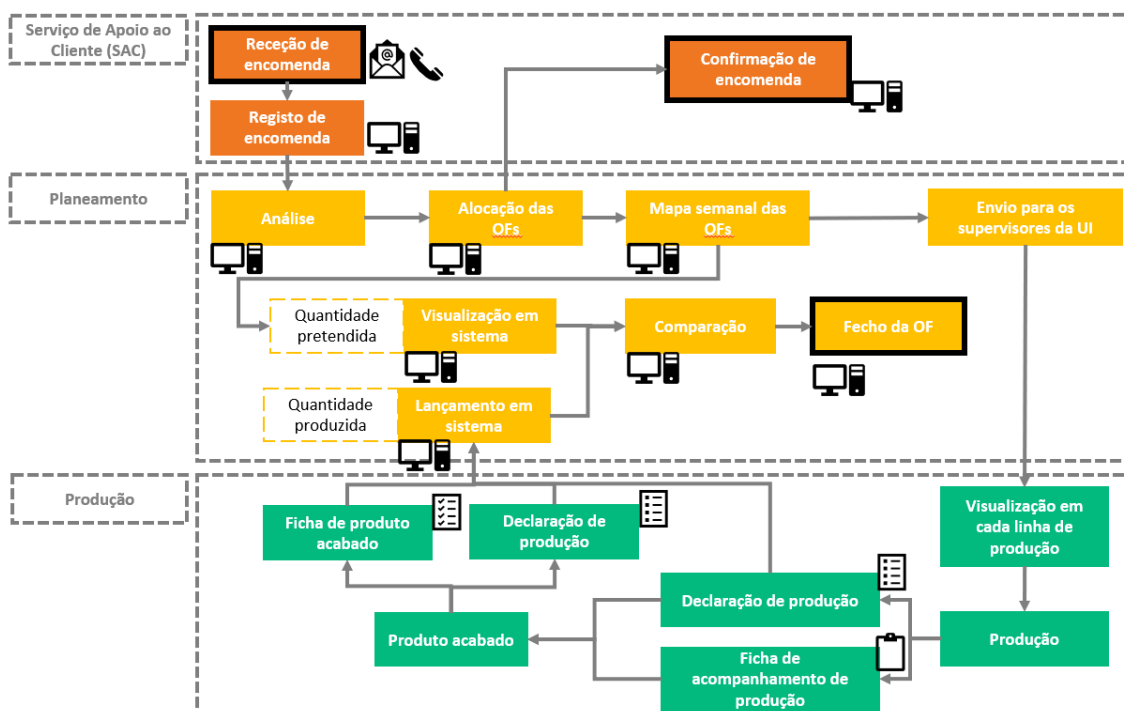


Figura 6 – Relações estabelecidas entre as áreas de Serviço de Apoio ao Cliente, Planeamento e Produção desde o processo de receção de encomenda até ao fecho da ordem de fabrico.

### 3.2. Planeamento da Produção na Empresa

Na empresa, o planeamento da produção é realizado a nível semanal. Tendo em conta as encomendas recebidas, cada planeador agrupa as OFs planeadas para a semana seguinte (dentro das respetivas unidades industriais) e elabora, no penúltimo dia útil da semana em curso, um mapa de produção em *Microsoft Office Excel* (MOE). Este plano tem em consideração as restrições de tempo e capacidade existentes.

Os mapas das diferentes áreas são partilhados com os respetivos supervisores, sendo prontamente afixados por estes nas mesmas. A folha tem como informações a identificação da OF, descrição do artigo, quantidade a produzir, tempo de produção expectável e um campo de observações em que é assinalado se a OF é prioritária. Em termos de sequenciamento, no caso do início da semana, as primeiras ordens de fabrico a realizar devem ser as que estão em atraso de semanas anteriores, sendo as prioritárias da semana em curso as próximas. O processo desenvolve-se, então, com base na experiência e/ou hábito dos supervisores, o que apesar de útil, pode conduzir a decisões menos acertadas, pelo que a automatização deste tipo de decisões tem sido um dos focos no departamento da Logística. Geralmente, depois de realizadas as ordens de fabrico prioritárias, procede-se à produção do mesmo tipo de referência de forma a reduzir o número de *setups*. De salientar que todo o sequenciamento é realizado mediante a disponibilidade de recursos, sejam matérias primas, caixas, etiquetas, panfletos ou mesmo mão de obra, ou seja, excluindo o caso de atrasos e prioridades, não existe um modelo de decisão definido.

Os tempos de produção planeados em sistema correspondem, na teoria, ao tempo de produção propriamente dito, com tempos de *setup* incluídos, afetado do OEE do equipamento.

Em termos de prazos, as ordens de fabrico devem estar concluídas no último turno da semana (geralmente, o terceiro turno de sexta-feira) para que sejam expedidas a partir do início da tarde de segunda-feira. Quando se trata de OFs prioritárias, o limite de conclusão passa para quarta-feira ou quinta-feira, sendo estas carregadas no respetivo dia útil que se segue.

### 3.3. Descrição do Equipamento

O foco deste projeto foi a linha de placas que está inserida na área de transformação de cilindros de cortiça e dedica-se à produção de placas de cortiça de variadas espessuras. Trata-se de uma zona constituída por sete laminadoras, sendo que uma delas está acoplada a uma lixadora, uma retificadora, uma serra e um centro de embalagem. Cada

posto é ocupado por um operador, à exceção da embaladora, onde trabalham dois, e a linha funciona, pelo menos, cinco dias por semana divididos por três turnos. O *layout* da linha é representado na Figura 7. Naturalmente, as abreviaturas “Lam” e “Lix” correspondem a “Laminadora” e “Lixadora”, respetivamente.

A fim de dar a conhecer o processo e as máquinas que constituem esta linha, é feito um resumo de cada uma ao longo deste subcapítulo.

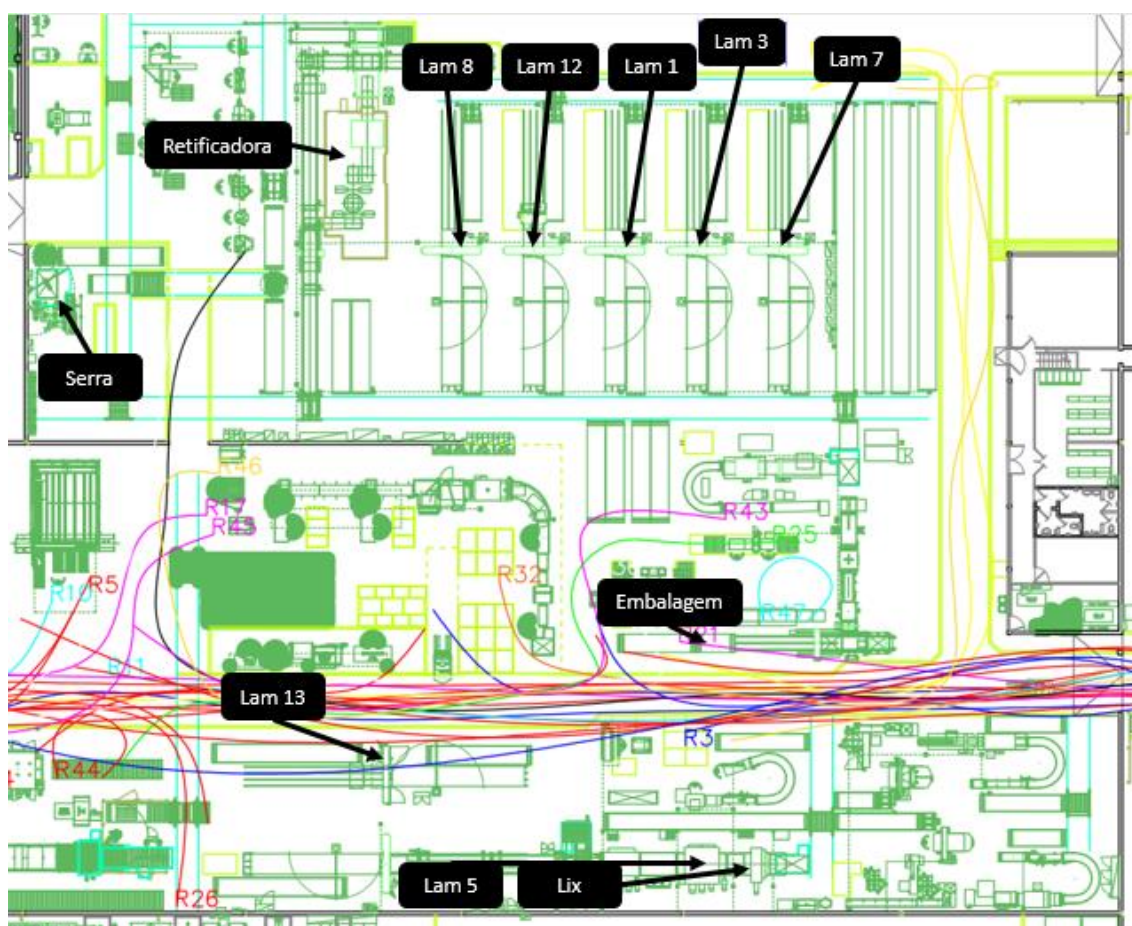


Figura 7 – *Layout* parcial da fábrica que contém a linha de produção em estudo.

### 3.3.1. Retificadora

A retificação dos blocos consiste em tornar as faces planas. Este processo é executado, através de serras circulares que, em rotação, desbastam as faces dos blocos, removendo material e tornando-as, então, uniformes.

O processo inicia-se com o transporte, por parte do operador, das paletes que contêm os blocos a retificar, sendo estes posteriormente colocados na linha de entrada da máquina. A retificação é, então, processada de forma autónoma, sendo que o processo termina com o empilhamento dos blocos retificados em paleta.

Este posto (Figura 8) caracteriza-se por ser o *bottleneck* da linha em estudo e, quando presente na gama operatória de um produto, corresponde à primeira operação.



Figura 8 – Retificadora.

### 3.3.2. Laminadoras

A laminadora (Figura 9) é uma máquina na qual se realiza o corte contínuo de blocos de cortiça de forma a obter placas. O cabeçote move-se na vertical, sendo que a sua deslocação define a altura da lâmina e, consequentemente, a espessura que se irá obter nas placas laminadas. A mesa, por sua vez, realiza a um movimento de vai e vem horizontal, fazendo passar os blocos pela lâmina de forma a realizar o corte.

As placas resultantes da operação de laminagem podem apresentar diversas espessuras, numa gama que não ultrapassa os 27mm.



Figura 9 – Laminadora: mesa com blocos (esquerda) e cabeçote (direita).

Dependendo das referências, o processo de laminagem pode apresentar algumas particularidades como, por exemplo, se se tratar de blocos mais densos, o esforço de corte será, naturalmente, maior, pelo que pode ser necessário laminá-los a quente de forma a facilitar a operação.

Existem sete laminadoras nesta área, sendo que uma delas será abordada de forma isolada dado que consiste na junção de duas máquinas. Devido aos diferentes acabamentos possíveis (etiqueta, carimbo/ marcação ou espessuras elevadas), há laminadoras que se destinam a tipos referências específicas.

No que toca ao *setup* destas máquinas, o processo é contínuo, isto é, realiza-se sempre que uma mesa de blocos é laminada mesmo que não se altere a referência.

Assumindo que a mesa está pronta para receber os blocos, o operador coloca um a um os blocos da paleta na mesa da laminadora, utilizando um manipulador.

De seguida, realiza-se a limpeza dos blocos, ou seja, com o objetivo de eliminar eventuais defeitos na face superior e torná-la plana e uniforme, estes passam pela lâmina de forma a que lhes sejam removidas finas espessuras de material. Em teoria, estes defeitos teriam sido corrigidos durante a retificação, no entanto, na prática, tal não acontece. Acontece também com regularidade a laminagem de blocos a bruto, isto é, blocos não sujeitos à operação de retificação.

Por fim, depois da laminagem, procede-se à limpeza da mesa e remoção das sobras de material, seguindo para o cálculo do número de blocos utilizados e número de placas rejeitadas, preenchimento da declaração de produção e declaração de paragens e abertura de nova ordem de fabrico no computador.

Cada laminadora está equipada com um computador onde opera o *software Egitron*, responsável pela transmissão dos mapas de produção semanais que servem de orientação para os diferentes postos de trabalho.

### 3.3.3. Laminadora - Lixadora

Este posto é próprio para materiais que necessitem de um acabamento que não é conferido durante o processo de laminagem. Trata-se de um acoplamento entre duas máquinas (Figura 10) e, naturalmente, recebe blocos que necessitem de ambas as operações. Apesar de tudo, é comum utilizar apenas a lixadora quando a operação precedente ocorre na serra.





Figura 10 – Posto laminadora com lixadora.

#### 3.3.4. Serra

Esta máquina (Figura 11) tem como propósito serrar blocos de forma a produzir placas cujas espessuras seriam inexecutáveis nas laminadoras, isto é, superiores a 27mm para blocos de baixa densidade e superiores a 6mm para blocos de alta densidade. O operador posiciona o bloco na mesa, ajusta-o de forma a serrar para a espessura pretendida e, de seguida, procede ao corte em placas. No 3º turno de cada dia, são colocados à entrada do posto os blocos que devem ser serrados no dia seguinte.



Figura 11 – Posto de serragem.

#### 3.3.5. Embalagem

O centro de embalagem (Figura 12) é constituído por três caminhos de rolos, onde são acumuladas as paletes a embalar, e a zona de embalagem propriamente dita. Conforme a prioridade e/ou material disponível (caixas ou panfletos, por exemplo), o operador seleciona o que vai embalar e, após a operação, as paletes são movidas para um caminho de rolos, onde aguardam até que sejam transportadas por um empilhador. Existem dois tipos de embalagem: com caixa ou a granel. Este facto deve ser salientado pois nas gamas operatórias, sempre que a operação de embalagem não existe, significa que é a granel e é realizada no posto de trabalho anterior (por exemplo, se a gama operatória

tem como última operação a laminagem, então a embalagem é realizada a granel nesse posto).



Figura 12 – Zona da paletização no centro de embalagem.

### 3.3.6. Dados dos Equipamentos

Tendo em conta o panorama atual da linha de produção em estudo, a empresa define as capacidades dos equipamentos de formas distintas, isto é, enquanto que nas laminadoras, lixadora, serra e embaladora a capacidade é representada pelo número de horas disponíveis, na retificadora é dada pela quantidade máxima de blocos que a máquina permite executar, o que reforça o estatuto de gargalo da linha de produção. As capacidades, em horas, dos equipamentos são demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Informação acerca das capacidades, em horas, dos equipamentos

<i><b>Máquina</b></i>	<i><b>Qtd</b></i>	<i><b>Turnos Diários</b></i>	<i><b>H/turno</b></i>	<i><b>Total [H/dia]</b></i>
Retificadora	1	3	7	21
Laminadora	7	2	6.5	13
Serra	1	3	6.5	19.5
Lixadora	1	2	6.5	13
Embalagem	1	3	6.5	19.5

Já relativamente às capacidades em termos de quantidades produzidas, a linha está limitada pela produção da retificadora, que tem capacidade para retificar, em média, cerca de 300 blocos por turno, ou seja, 900 blocos diários.

Os tempos de *setup* são também importantes para definir limites de produtividade de uma linha de produção, uma vez que são paragens, em muitos casos, obrigatórias. Podem ser divididos em dois grupos: fixos e variáveis. O primeiro é referente aos tempos que acontecem inevitavelmente durante o processo produtivo e o segundo corresponde a situações mais específicas, como, por exemplo, a preparação de um equipamento para uma referência específica.

As mudanças diferem de máquina para máquina, sendo, neste caso, detalhadas da seguinte forma:

Retificadora:

- *Setup* fixo: ajuste de parâmetros na máquina sempre que se altera a referência do bloco;
- *Setup* variável: trata-se de um caso de muito baixa frequência, que exige limpeza cuidada da máquina para um determinado tipo de referência (blocos de cor).

Laminadoras:

- *Setup* fixo: limpeza da mesa por ar comprimido, colocação dos blocos na mesa e limpeza dos blocos. Acontece sempre que se conclui uma mesa de blocos (por cada 12 ou 15 blocos, dependendo da medida dos mesmos);
- *Setup* variável: irrelevante/ inexistente.

Serra:

- *Setup* fixo: colocação do bloco na mesa de trabalho (um bloco de cada vez) e ajuste da espessura;
- *Setup* variável: Ajuste de comprimento sempre que se altera a medida do bloco (inglesa para métrica ou vice-versa).

Lixadora:

- *Setup* fixo: irrelevante/ inexistente;
- *Setup* variável: alteração da espessura ou mudança de lixa (consumível).

Embaladora:

- *Setup* fixo: sempre que há mudança de ordem de fabrico;
- *Setup* variável: alteração da dimensão de caixa ou da necessidade de plastificar.

A Tabela 3 mostra os diferentes tipos de *setup* por equipamento, em média, medidos ao longo de duas semanas.

Tabela 3 – Tempos de *setup* fixos e variáveis dos diferentes equipamentos da linha de produção.

<b><i>Máquina</i></b>	<b><i>Setups Fixos [min]</i></b>	<b><i>Setups Variáveis [min]</i></b>
Retificadora	2	45
Laminadora	10	0
Serra	2	1
Lixadora	0	4
Embalagem	3	10

A partir dos valores acima representados e tendo em conta que os tempos de operação expectáveis em sistema contêm os tempos de *setup*, foi estabelecido que um estudo mais aprofundado destes não seria relevante para o problema abordado. No entanto, como será visto no próximo capítulo, o facto de ter em consideração uma redução de

*setups* na retificadora constitui um ganho na linha na medida em que, tratando-se de uma máquina em que a operação se processa de forma automática, o operador alocado fica com disponibilidade para repor e/ou organizar os *buffers* das outras máquinas.

### 3.4. Produtos

Apesar da vastidão do leque de referências existente, o tipo de produto final passa por placas de cortiça ou mesmo blocos em bruto. No entanto, o tipo de granulado utilizado durante a aglomeração dos blocos varia, conforme a densidade e a volumetria do grão. Os blocos dividem-se em dois grupos no que a dimensões diz respeito: blocos de medidas métricas e medidas inglesas (Tabela 4).

Tabela 4 – Dimensões dos blocos e respetiva classificação.

<b>Dimensões do Bloco [mm]</b>	<b>Medida</b>
940x640x250	Inglesa
950x650x200	Inglesa
950x650x210	Inglesa
1030x530x210	Métrica

A produção média é dada pelo número médio de blocos trabalhados por equipamento, tendo os valores abaixo apresentados na Tabela 5 sido obtidos através da média de duas semanas.

Tabela 5 – Produção média diária por equipamento ao longo de três semanas.

	<b>Retificadora</b>	<b>Laminadoras</b>	<b>Laminadora-lixadora</b>	<b>Serra</b>
<b>Produção Média Diária [BL]</b>	831.3	756.4	162.9	122.6

Relativamente à embaladora, dada variabilidade, foi definida uma cadência média de 37 caixas por hora.

### 3.5. Processo Produtivo e Gamas Operatórias

Após a aglomeração, os blocos são colocados no respetivo armazém onde devem permanecer durante quatro dias para estabilizar. Estando aptos para a transformação, são transportados para a linha de produção, seguindo para a retificadora ou diretamente para as laminadoras, serra ou lixadora, caso a primeira operação não seja necessária. O processo é, geralmente, concluído no centro de embalagem, podendo, no entanto, seguir diretamente dos postos de laminagem, serra ou lixagem para o armazém de produto acabado (APA).

Com o objetivo de caracterizar o sistema produtivo, foi realizada uma análise aos últimos oito meses do ano de 2018. Em estudo estiveram as quantidades produzidas por referência de forma a poder quantificar as gamas operatórias existentes. A Tabela 6 demonstra as percentagens por gama operatória, assim como o respetivo número total de blocos produzidos.

Tabela 6 – Gamas operatórias detalhadas com dados referentes aos últimos oito meses de 2018. As operações que são seguidas por um asterisco são realizadas numa outra linha de produção. A primeira coluna corresponde à identificação da gama operatória (GO); as quatro colunas seguintes indicam as operações contidas na gama operatória; as últimas três referem-se ao número de blocos, percentagem correspondente e percentagem acumulada.

GO_ID	OP10	OP20	OP30	OP40	Nº Blocos	%	% Cum
GO_1	Retificar	Laminar	Embalar	-	76883	57.97%	57.97%
GO_2	Retificar	Laminar	-	-	15530	11.71%	69.68%
GO_7	Retificar	Serrar	Lixar	Embalar	10658	8.04%	77.72%
GO_5	Retificar	Serrar	Lixar*	Embalar	7404	5.58%	83.30%
GO_3	Laminar	Embalar	-	-	6156	4.64%	87.94%
GO_9	Retificar	Serrar	Embalar	-	4808	3.63%	91.57%
GO_13	Retificar	Lixar	Embalar	-	2677	2.02%	93.59%
GO_12	Lixar	-	-	-	2476	1.87%	95.45%
GO_6	Retificar	Serrar	Lixar*	-	1446	1.09%	96.54%
GO_15	Lixar	Embalar	-	-	1403	1.06%	97.60%
GO_14	Retificar	Lixar	-	-	990	0.75%	98.35%
GO_4	Retificar	Serrar*	Laminar	-	691	0.52%	98.87%
GO_10	Serrar	Embalar	-	-	661	0.50%	99.37%
GO_11	Serrar	-	-	-	477	0.36%	99.73%
GO_16	Retificar	Laminar	Lixar*	Embalar	215	0.16%	99.89%
GO_8	Retificar	Serrar	Lixar	-	145	0.11%	100.00%

Na Figura 13 encontra-se esquematizado o processo produtivo com as gamas operatórias mais relevantes.

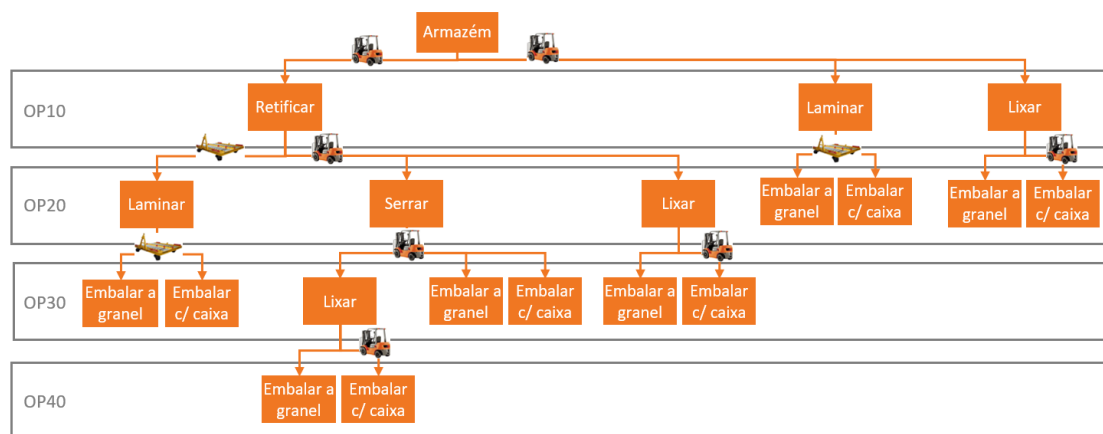


Figura 13 – Esquema representativo do processo de produção por gamas operatórias. Estão também representados os modos de movimentação de paletes entre posto, isto é, empilhador ou caminhos de rolos.

O operador da retificadora é o responsável por fornecer material às laminadoras.

Os blocos não retificados são transportados com o empilhador diretamente do armazém para as laminadoras. Quando devem ser retificados, são transportados com o empilhador do armazém para a retificadora e, de seguida, para as laminadoras via *transfer* (caminho de rolos) ou para a serra e lixadora através de empilhador.

Já nas laminadoras, as paletes com os blocos ficam em fila de espera no tapete de entrada, procedendo-se à laminagem dos blocos em placas e estas são novamente empilhadas em paletes e colocadas em fila de espera, no tapete de saída. Posteriormente, o *transfer* transporta as paletes até à embalagem.

O comprimento e a largura das placas são os mesmos que os blocos, excluindo certas exceções, sendo a espessura a dimensão a ser trabalhada nas laminadoras.

Tendo em consideração que esta é uma das linhas mais sobrecarregadas da fábrica, com várias dezenas de ordens de fabrico semanais para realizar, e que esta contém postos de trabalho que condicionam a sua capacidade, é necessário que a programação da produção seja realizada de forma a que haja um balanceamento, isto é, de nada vale acelerar o processo de laminagem quando a retificadora e/ou a embalagem não conseguem dar resposta. Apesar de limitar o processo produtivo, o centro de retificação não apresenta *work in progress* (WIP) pois sempre que esta operação é solicitada, corresponde ao início da gama operatória. Já no caso da embalagem (última operação, quando solicitada), trata-se de uma situação mais crítica dado que a acumulação de paletes à entrada do posto limita, por vezes, o fluxo de produção e transporte para o APA.

### 3.6. Classificação do Sistema Produtivo

Os diversos sistemas produtivos revelam características diferenciadoras nos seus processos, o que leva a que o modo como são identificados, projetados e analisados requererá abordagens também diferentes. O agrupamento dos processos em tipos, com base nas suas semelhanças e diferenças, tem bastante interesse quando, por exemplo, se pretende desenvolver qualquer espécie de análise sobre o sistema operativo.

Na Tabela 7 é feita uma análise resumida da informação descrita ao longo deste capítulo.

Tabela 7 – Classificação dos diversos parâmetros do sistema de produção em estudo.

Parâmetros	Classificação
Implantação	<i>Job-shop</i> (ou Implantação por Processo ou Oficinas de Fabrico)
Fluxo dos Materiais	Intermitente
Relação com o Cliente	<i>Make to Order</i>
Quantidades Produzidas de um mesmo Produto	Pequenas Séries (produção por lotes)



Tipologia da Estrutura dos Produtos ou Classificação VAT	Estrutura em T
Variabilidade dos Produtos Produzidos	Diferenciados
Gama Operatória	Diferentes
Natureza dos Produtos	Discreta
Caracterização da Procura	Procura estável a variável
Organização	Flexível
Produção no Espaço	Concentrada

### **Tipo de Implantação**

A linha de produção em estudo caracteriza-se por apresentar um tipo de implantação *job-shop*, também denominada por Oficinas de Fabrico.

Existem algumas características que são facilmente visíveis quando se visitam as instalações de produção. A forma como as máquinas se encontram distribuídas, de acordo com as gamas operatórias, é uma característica de um *job-shop*. Por outro lado, também há alguma diversidade de produtos, os quais são produzidos em pequenas/médias quantidades e apenas por encomenda, sendo que existe também uma certa diversidade no que a gamas operatórias diz respeito.

Uma grande dificuldade neste tipo de implantação é conhecer o estado de ocupação de uma dada secção ou na planta fabril no geral quando é lançada uma ordem de fabrico, mesmo sabendo qual o percurso que o produto segue para ser finalizado.

### **Fluxo de Materiais**

A caracterização quanto ao fluxo assenta no grau de continuidade que caracteriza o sistema, isto é, quanto mais esperas o produto sofre ao longo do seu processo, mais intermitente é o sistema, contrariamente, mais contínuo será. Uma vez que se trata de uma linha na qual existem múltiplas sequências de operações, um elevado número de OFs realizadas simultaneamente e condições de trabalho variáveis, trata-se de um sistema com fluxo intermitente.

### **Relação com o Cliente**

Excluindo casos específicos, a empresa segue um método operativo de fabrico por encomenda, ou *Make to Order* (MTO), ou seja, possui um número básico de produtos/modelos, personalizáveis principalmente a nível de dimensões, partindo de uma gama de medidas características anteriormente referenciadas.

Devido ao facto de a produção se efetuar apenas mediante encomenda, o tempo de resposta ao cliente torna-se mais moroso do que se existisse produção para *stock*. Como agravante existem variáveis que afetam constantemente o planeamento da produção, contribuindo para um atraso ainda maior na entrega de uma dada encomenda.

### **Quantidades Produzidas de um Mesmo Produto**

Neste tópico, a empresa segue uma produção de pequenas séries. Existe alguma diversificação de produtos, sendo que as suas gamas operatórias também apresentam variabilidade.

### **Tipologia da Estrutura dos Produtos ou Classificação VAT**

Dos produtos existentes, é possível verificar apresentam a tipologia em estrutura T, ou seja, através de operações comuns, criam-se muitos produtos finais semelhantes.

### **Variabilidade dos Produtos Produzidos**

A linha de produção em estudo apresenta, como já foi referido, uma grande variedade de produtos finais.

### **Gama Operatória**

Os produtos têm gamas operatórias diferenciadas, pois, apesar de no processo de transformação passarem por máquinas que são partilhadas por vários produtos, têm operações diferenciadas, assim como processos de montagem, entre outros.

### **Natureza dos Produtos**

A natureza dos produtos caracteriza-se como discreta, havendo uma grande diversidade de produtos.

### **Caracterização da Procura**

Apesar de tratar de uma empresa cujo produto (cortiça) é muito específico e o método operativo é MTO, a dimensão da mesma faz com que a procura seja variável, mas com alguma estabilidade.

### **Organização**

A organização apresenta-se, de modo geral, como flexível. O vasto catálogo de produtos, alteração constante das fórmulas que resultam em blocos ou cilindros (conforme necessidades) e a política de melhoria contínua são alguns dos exemplos relevantes.

### **Produção no Espaço**

A produção apresenta-se como concentrada, dado que a empresa se divide em unidades industriais destinadas a famílias de produtos distintas.

## ***3.7. Levantamento de Problemas e Propostas de Melhoria***

O estudo realizado visa contribuir para uma melhoria na produtividade da linha de produção, sendo que, neste caso em concreto o objetivo passa pelo desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão que facilite a implementação do planeamento diário e que permita abordar esta problemática através de um sequenciamento que garanta, não só soluções satisfatórias (tanto em termos de resultados, como em termos de tempo de execução), mas também um correto balanceamento da linha.

Realizada a análise ao sistema produtivo, foram enumerados aqueles que seriam os principais entraves para o bom funcionamento do planeamento de produção:

- **Programação da produção consiste num processo manual**  
Este processo é baseado na experiência e hábito dos supervisores e operadores e conduz, por vezes, a ações que facilitam o trabalho no momento da decisão,



mas que prejudicam a eficácia e/ou eficiência do plano. Por exemplo, sempre que é tomada a decisão de passar operações de maior complexidade para o turno seguinte por motivos de conveniência, dá-se um aumento desnecessário do tempo de ciclo médio. Trata-se de algo que acontece regularmente no posto de embalagem, onde se perde tempo a reorganizar os *buffers*.

- **Ausência de informação em tempo real**

Um sistema produtivo real é altamente dinâmico, pelo que é importante que a informação possa fluir entre as diferentes áreas de forma não a criar problemas como atrasos sem que estes sejam atempadamente comunicados.

- **Estruturas de produto/ tempos desatualizados no ERP**

Existem operações incorretamente alocadas a determinadas máquinas e tempos que não correspondem à realidade.

- **Sequenciamento por tipo de bloco na retificadora**

No posto da retificadora, a função do operador é responder no momento às necessidades das restantes máquinas, pelo que não tem em consideração as OFs mas sim ao tipo e número de blocos a retificar. Este tipo de sequenciamento promove, para além de alguma confusão, um número elevado de OFs incompletas ao longo da linha de produção. Uma vez que as paletes são transportadas para o APA apenas quando são a OF é concluída, o WIP gerado pode ser reduzido, mudando a abordagem na retificadora.

De maneira a corrigir alguns destes problemas, foi proposto o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão ao planeamento e supervisores de produção que possibilitasse:

- Verificação da gama operatória e tempos respetivos;
- Atribuição automática das laminadoras;
- Controlo do consumo de blocos, de forma a que seja possível priorizar OFs cujo número de blocos necessários esteja disponível;
- Reduzir número de OFs em atraso, reduzir *lead times* e maximizar a utilização de recursos.

# FERRAMENTA DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

- 4.1. Descrição do Algoritmo
- 4.2. Constituição do Documento
- 4.3. Processo de Utilização da Ferramenta
- 4.4. Funcionamento da Ferramenta



## 4. FERRAMENTA DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Com vista a automatizar o processo de programação da produção, foi proposto o desenvolvimento de uma aplicação de sequenciamento que apoie a tomada de decisão. Para além do sequenciamento propriamente dito, a ferramenta deverá servir de apoio para correções de tempos e gamas operatórias em sistema e balancear o fluxo produtivo. Ao longo deste capítulo será feita a abordagem à utilização da ferramenta, sendo que no fim, será apresentado um exemplo com valores meramente ilustrativos, não sem antes abordar o algoritmo por detrás da mesma.

A ferramenta terá como utilizadores os supervisores e planeador da área em estudo, devendo, para além do que foi previamente referido, simplificar o processo de sequenciamento e posterior controlo da produção. Dada a realidade do ambiente industrial em causa, foram definidas com os diretores da Logística, Planeamento e respetiva Unidade Industrial algumas prioridades no que toca ao desenvolvimento da ferramenta. Tendo em conta a experiência de projetos previamente realizados e a dinâmica no dia a dia na fábrica, a simplicidade e rapidez do processo foi uma dessas prioridades, assim como a adaptação da ferramenta às condicionantes da linha de produção.

Toda a programação inerente ao desenvolvimento do projeto foi realizada em VBA a partir do *Microsoft Office Excel*.

Nesta secção apresentam-se sucintamente algumas técnicas úteis neste contexto. Começa-se por fazer uma referência às regras de prioridade utilizadas para a definição da sequência de tarefas.

No contexto de uma única máquina as regras de prioridade são utilizadas para a criação da sequência segundo a qual um conjunto de tarefas deve ser realizado. Existe uma grande variedade de regras de prioridade, de entre as quais se destacam:

- **First In First Out (FIFO)** – é sequenciada primeiro, a primeira tarefa a estar disponível.
- **Earliest Due Date (EDD)** – Data de entrega mais cedo) – são primeiro sequenciadas as tarefas com data de entrega mais cedo;
- **Shortest Processing Time (SPT)** – Tempo de Processamento mais curto) – são sequenciadas primeiro as tarefas que demorem menos tempo a ser processadas;

No caso de problemas de *job-shop*, após ser definida a sequência das tarefas através de uma destas regras, procede-se ao escalonamento dessa sequência de tarefas, que consiste em alocar as operações das tarefas aos recursos, colocando a operação no primeiro espaço disponível, ou seja, deve ser alocada ao primeiro intervalo de tempo

que o recurso esteja disponível e que ocorra depois da operação anterior da mesma tarefa.

Numa primeira fase, os dados guardados em bases de dados são lidos, copiados e filtrados para uma tabela que serve de base para o planeamento. De seguida, os dados correspondentes às diferentes OFs são distribuídos e ordenados pelos respetivos postos de trabalho.

Para a automatização dos processos de escalonamento e sequenciamento, foi tida em conta uma série de medidas que permitiram estabelecer um padrão relativamente ao funcionamento devido da linha de produção. As principais automatizações consistiram na alocação de laminadoras aos diferentes tipos de produto e à atribuição de diferentes pesos para diferentes datas de conclusão, de forma a estabelecer uma regra (Figura 14). Uma vez que as laminadoras 1 e 3 constituem uma espécie de “caso geral”, ou seja, não apresentam nenhuma particularidade tanto de equipamento como de materiais nelas processados, são classificadas como *standard*. Dado que grande parte das OFs são alocadas a estas laminadoras, o algoritmo poderá provocar uma falta de balanceamento das laminadoras numa fase inicial. Este balanceamento é relevante no caso de haver disponibilidade nas laminadoras *não standard* num plano em que as *standard* se encontram sobrecarregadas, provocando atrasos desnecessários.

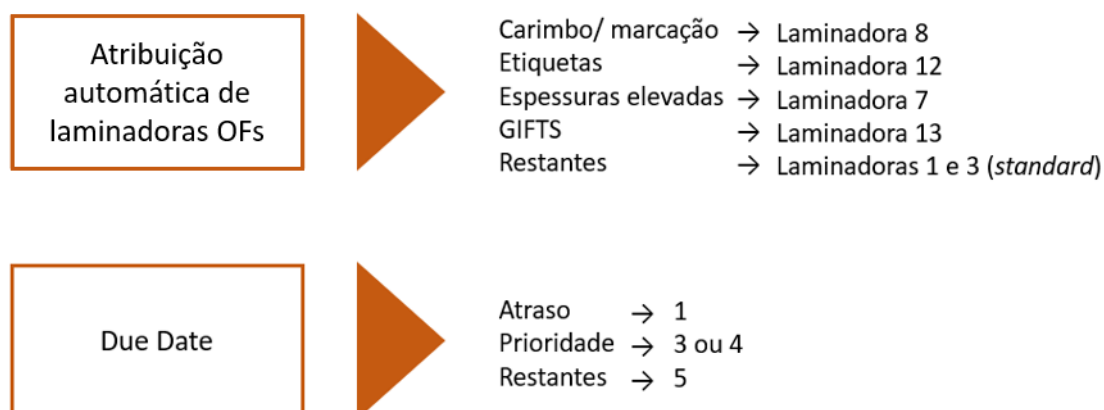


Figura 14 – Principais medidas de automatização para o escalonamento e sequenciamento.

#### 4.1. Descrição do Algoritmo

Numa primeira fase, o funcionamento do algoritmo é demonstrado, de forma resumida, no fluxograma da Figura 15. De seguida, os pontos mais importantes do mesmo são explorados com o intuito de perceber os princípios utilizados. Apesar da referência ao planeamento diário ao longo da dissertação, foi imposto, por questões de visibilidade, que o *output* da ferramenta consista num plano com horizonte temporal de dois dias.

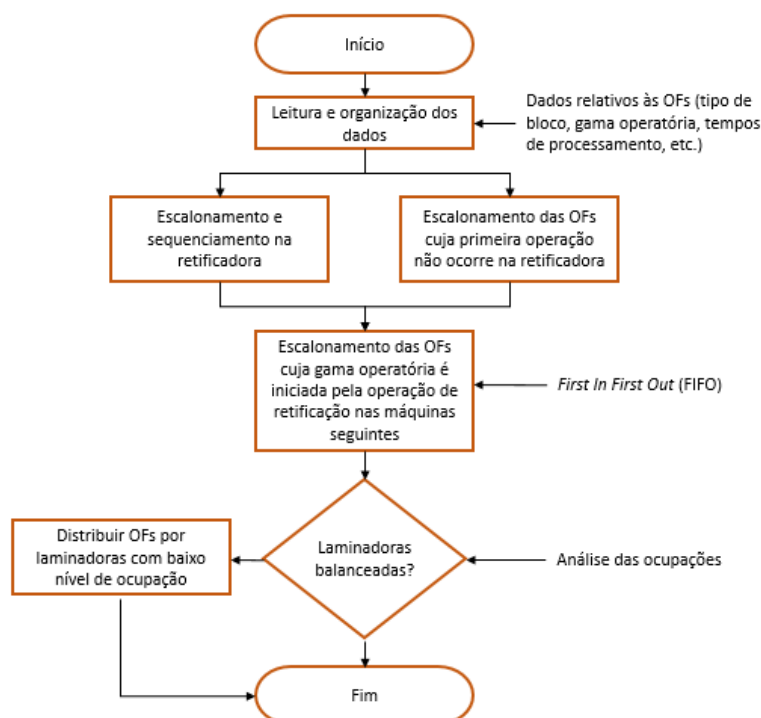


Figura 15 – Fluxograma representativo do funcionamento do algoritmo.

Analisando o fluxograma por partes, o processo inicia-se com a leitura de dados que, tal como foi previamente referido, corresponde ao filtro da informação mais relevante nas BDs, de forma a servir de apoio para análise do utilizador e também para a restante programação.

De seguida, dá-se o escalonamento e sequenciamento na retificadora e, paralelamente, o escalonamento das OFs cuja operação a realizar não seja a de retificar.

### Escalonamento e sequenciamento na retificadora

Uma vez que se trata do *bottleneck* da linha, sempre que solicitada, é a primeira operação da gama operatória, e cerca de 90% das OFs requerem esta operação (Tabela 6), todo este processo é focado neste posto.

O processo inicia-se com três decisões, isto é, caso a operação esteja já realizada, não haja blocos disponíveis para a realização da mesma ou exista outro tipo de impedimento, como avaria da máquina seguinte ou falta de caixa, por exemplo, a OF não é planeada. Quando se trata da terceira decisão, o *input* é inserido de forma manual pelo utilizador da ferramenta. Posteriormente, as OFs a escalonar são organizadas em relação aos postos seguintes e ordenadas por data de entrega, *setup*, tipo de bloco e menor tempo de processamento. Esta ordem foi definida juntamente com os responsáveis da área em questão, de forma a que critérios como a realização em primeiro lugar de OFs em atraso ou prioritárias, a maximização do tempo de produção da retificadora e a resposta ao maior número de encomendas possível fossem cumpridos.

Para limitar a produção da retificadora em dois dias, são tidos em conta os tempos cumulativos dos postos de trabalho seguintes. O programa analisa, linha a linha, se o

tempo acumulado para um posto de trabalho ultrapassa o valor que foi definido como limite de capacidade e, caso tal se verifique, a OF é excluída do plano. No caso das laminadoras 7, 8 e 12 terem uma carga semanal inferior à sua capacidade produtiva de dois dias, essa diferença é aplicada através da retificação de blocos de OFs alocadas às laminadoras standard. O fluxograma da Figura 16 esquematiza este processo.

#### LEGENDA

- $t_{total\_m}$  → tempo total de operação da máquina  $m$
- $cap\_m$  → capacidade da máquina  $m$
- $t_{lam\_1\_3}$  → tempo cumulativo das laminadoras 1 e 3
- $lam\_não\_standard$  → laminadoras 7, 8 e 12

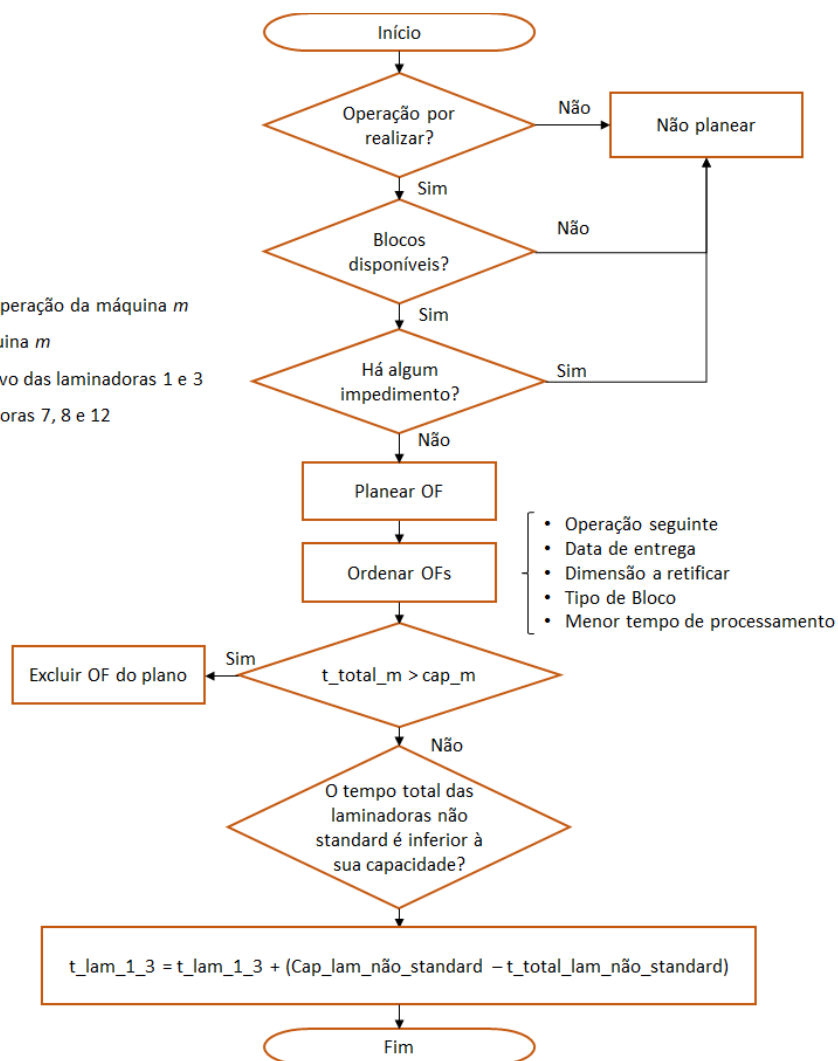


Figura 16 – Parte do algoritmo que corresponde ao escalonamento das OFs na retificadora.

#### Escalonamento e sequenciamento de OFs que não solicitam a operação de retificação

A primeira parte do processo é análoga ao anterior, sendo que a sua conclusão é mais simples, na medida em que tem apenas em consideração o próprio posto, como é demonstrado na Figura 17. Neste caso, a ordem prende-se pela data de entrega, seguida pelo tipo de bloco e, finalmente, pelo menor tempo de processamento.

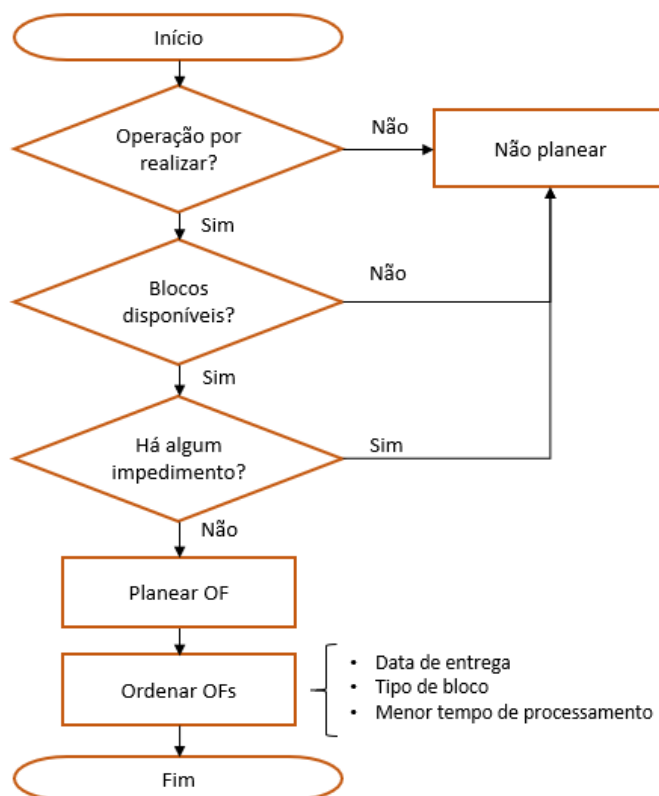


Figura 17 – Parte do algoritmo correspondente ao escalonamento de OFs que não requerem a operação de retificação.

Procede-se ao escalonamento das operações posteriores à retificação pelas outras máquinas, adotando um modelo FIFO.

Neste ponto, o planeamento a nível teórico está concluído, isto é, todas as máquinas estão atribuídas às respetivas operações.

No entanto, uma vez que a ocupação das duas laminadoras *standard* é, geralmente, muito superior à das restantes laminadoras, é aplicada a distribuição das OFs de forma a balancear o sistema produtivo. Deste modo, é possível, através de regras previamente estabelecidas com os supervisores de produção, evitar a criação de outros gargalos ou tempos inativos desnecessários.

No caso de existirem operações nas laminadoras *standard* cujo início seja atrasado em, pelo menos uma hora, devido ao processamento de outra operação (comum em casos de sobrecarga), estas podem ser escalonadas noutras laminadoras, consoante as respetivas ocupações. As disponibilidades das laminadoras não *standard* são definidas através de eventuais “tempos mortos” entre, antes ou depois de operações.

Esta heurística é representada na Figura 18, onde as variáveis de tempo são expressas em horas.



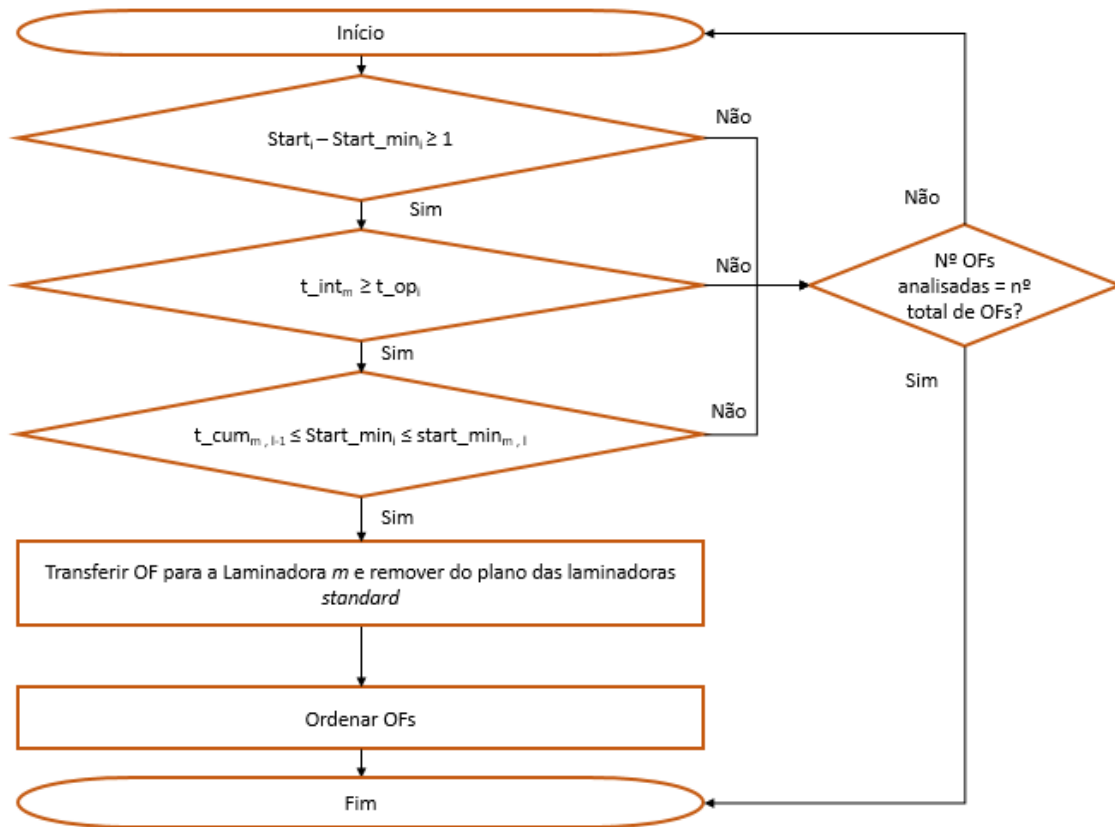


Figura 18 – Representação da heurística de balanceamento das laminadoras.

Na Figura 18 estão representadas as seguintes variáveis:

- **Start<sub>i</sub>** – tempo de início efetivo da operação *i* nas laminadoras *standard*
- **Start<sub>min<sub>i</sub></sub>** – tempo do final da operação anterior, que, para este efeito, coincide com o momento a partir do qual a operação está pronta para ser iniciada.
- **t<sub>int<sub>m</sub></sub>** – tempo entre operações na laminadora *m* (não *standard*).
- **t<sub>op<sub>i</sub></sub>** – tempo de processamento da operação *i*.
- **t<sub>cum<sub>m, l-1</sub></sub>** – tempo cumulativo anterior da laminadora *m*.
- **start<sub>min<sub>m, l</sub></sub>** – *l*-ésimo tempo de início mínimo da operação na laminadora *m*.

#### 4.2. Processo de Utilização da Ferramenta

De forma a entender o funcionamento da aplicação, é necessária uma breve descrição dos diferentes elementos nela presentes, isto é, bases de dados (BDs), tabelas informativas e tabelas dinâmicas.

As BDs contêm informações detalhadas relativas às OFs, na forma de tabela. Estas são retiradas do *Enterprise Resource Planning* (ERP) da empresa e devem ser atualizadas, no mínimo, semanalmente. A ferramenta contém dados relativos aos diferentes postos de trabalho existentes na linha de produção.

As tabelas informativas são tabelas elaboradas de forma manual com o mesmo propósito das BDs, sendo que também servem de suporte na programação em VBA. As tabelas dinâmicas correspondem ao agrupamento da informação pretendida por posto de trabalho, isto é, é nestas que será disposto o sequenciamento das OFs sempre que o programa for corrido.

O processo de utilização está descrito na Tabela 8:

Tabela 8 – Procedimento a seguir para a utilização da ferramenta.

Ordem	Tarefa	Modo de Aplicação	Tempo de Execução	Frequência
1	Atualizar Semana e Nº de Dias	Manualmente	-	Semanal
2	Atualização das Bases de Dados	VBA	10min	Semanal
3	Atualizar Gamas Operatórias	VBA	4min	Semanal
4	Ajustar Stock de Blocos	Userform VBA	-	Diária
5	Correr Plano	VBA	1min	Diária

Presumindo que o momento é o final da semana anterior, o processo inicia-se no menu principal, demonstrado na Figura 19. Seleciona-se, de forma manual, a semana atual, e procede-se à atualização das BDs e gamas operatórias das OFs no respetivo plano semanal, premindo os respetivos botões. No lado esquerdo são mostrados dados como o número de OFs programadas para a semana em curso e quantidade de blocos a retificar e a laminar consoante o plano. À direita, para além de breves instruções de funcionamento da ferramenta, são mostradas as ocupações por equipamento, assim como a percentagem de cumprimento do plano semanal.

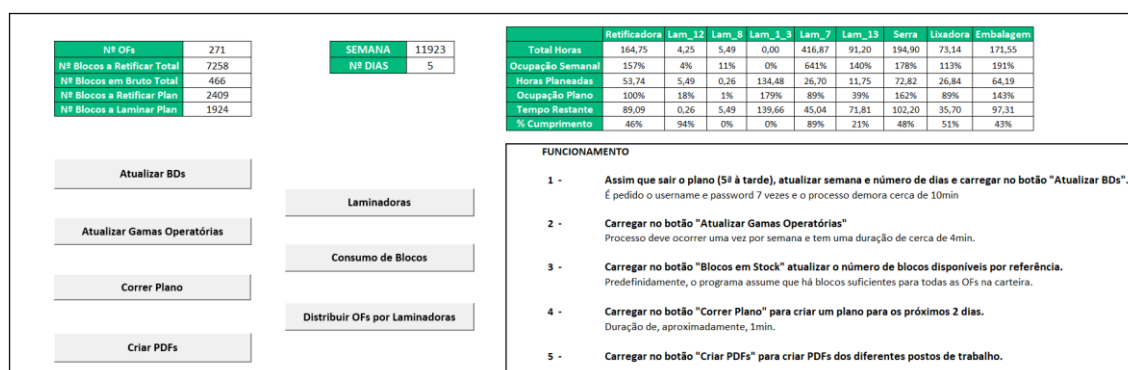


Figura 19 – Disposição do menu inicial da ferramenta.

No menu inicial aparecem alguns medidores de desempenho, nomeadamente de produção:

- Quantidade de blocos a retificar e a laminar no plano semanal e diário (à esquerda na Figura 19);

- Ocupação por equipamento do plano semanal e diário (à direita na Figura 19);
- Taxa de cumprimento do plano semanal à medida que as OFs são dadas como concluídas (à direita na Figura 19).

As restrições aplicadas para o funcionamento da ferramenta, nomeadamente as de capacidade dos equipamentos são demonstradas na Figura 20. Por exemplo, no caso da retificadora, após a ordenação das OFs, o planeamento é limitado pelo número de blocos retificados diariamente, no entanto, como a programação da produção apresenta um horizonte temporal de dois dias, sempre que corrido, o programa está limitado, naturalmente, pelo dobro dessa quantidade. No caso das restantes máquinas, a restrição de capacidade prende-se pelo número de horas diárias de atividade.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Máquina	Centro	Qtd	Turnos diários	H/turno	Total	Nº Blocos Diários
2	Retificadora	H266	1	3	7	21	840
3	Laminadora	H263	6	2	6.5	78	
4	Laminadora de Etiquetas e Marcação	H263	1	2	6.5	13	
5	Serra	H264	1	3	7.3	21.9	
6	Lixadora	H265	1	2	6.5	13	
8	Embalagem	H268	1	3	5.5	16.5	
9							
10	Dimensões do Bloco	Altura do Bloco	Medida	BL	Nº Blocos por Mesa		
11	940x640	250	Inglesa	BL1	12		
12	950x650	200	Inglesa	BL2	12		
13	1030x530	210	Métrica	BL3	15		
14	950x650	210	Inglesa	BL3	12		

Figura 20 – Definição das restrições de capacidade dos equipamentos.

Para que o utilizador tenha uma maior visibilidade sobre as ordens de fabrico a realizar, é apresentada uma tabela (Figura 21) que demonstra a gama operatória das mesmas assim como o estado (pronto a realizar ou não e/ou o que já foi realizado).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	OF	Bloco2	Dimensão a Retificar	OP10	t1	E1	R1	OP20	t2	E2	R2	OP30	t3	E3	R3	OP40	t4	E4
2	W769473	8405	Em Bruto (Medida Inglesa)	Retificadora	0.609	x		Serra	2.333	x		Embalagem	0.875	x				
3	W769569	8405	Em Bruto (Medida Inglesa)	Retificadora	2.971	x		Serra	13.667	x		Lixadora	7.000	x		Embalagem	5.125	x
4	W773902	9436	Em Bruto (Medida Métrica)	Laminadora 13	0.188	x												
5	W769474	8405	Em Bruto (Medida Inglesa)	Retificadora	0.609	x		Serra	2.333	x		Embalagem	0.875	x				
6	W769475	8405	Em Bruto (Medida Inglesa)	Retificadora	0.609	x		Serra	2.333	x		Lixadora	7.000	x		Embalagem	0.875	x
7	W769514	8512	Em Bruto (Medida Inglesa)	Retificadora	0.109	x		Serra	0.500	x		Embalagem	0.081	x				
8	W769570	8405	Em Bruto (Medida Inglesa)	Retificadora	2.971	x		Serra	13.667	x		Embalagem	5.125	x				
9	W767973	8748	930 mm x 635 mm	Retificadora	2.728	x		Laminadora	28.700	x		Embalagem	3.200	x				
10	W764245	8457	920 mm x 615 mm	Retificadora	0.136	x		Serra	0.833	x		Embalagem	0.156	x				
11	W764246	8457	920 mm x 615 mm	Retificadora	0.466	x		Serra	2.500	x		Embalagem	0.625	x				
12	W767289	8457	920 mm x 615 mm	Retificadora	0.065	x		Laminadora	0.179	x		Embalagem	0.094	x				
13	W773901	8405	910 mm x 610 mm	Retificadora	0.029	x		Laminadora 13	0.262	x								
14	W773898	8405	780 mm x 580 mm	Retificadora	2.423	x		Laminadora 13	34.701	x								

Figura 21 – Tabela demonstrativa da gama operatória de cada OF.

Nesta tabela, o utilizador deve preencher manualmente as quantidades produzidas no final do turno ou dia, de forma a que as OFs ou operações concluídas não sejam planeadas na próxima vez que o programa seja corrido. Este preenchimento deve ser feito através da remoção do “x” na terceira coluna de cada operação (colunas “F”, “J”, “N” e “R” da Figura 21) ou da inserção da quantidade já realizada na quarta coluna (colunas “G”, “K” e “O” da Figura 21).

Estando a tabela preenchida, regressa-se ao menu principal (Figura 19) e carrega-se no botão “Consumo de Blocos” de forma a ajustar o número de blocos em stock (Figura 22). Este comando atualiza automaticamente a quantidade de OFs a produzir, tendo em conta a quantidade necessária de blocos para cada uma.

5xxx	80xx	81xx	83xx	84xx	85xx	87xx	88xx	9xxx
5608	8002	8122	8300	8402	8512	8702	8810	9400
	8003	8123	8301	8403	8580	8703	8820	9426
	8004		8302	8405		8747	8821	9431
	8006		8303	8455		8748	8822	9436
	8026		8304	8457		8749	8826	9644
	8057		8305			8750	8827	
	8058		8350			8781	8872	
	8061							

Buttons: Gravar stock, Valores Início da Semana, Fechar

Figura 22 – Userform para ajustar o stock de blocos.

Outra opção que permite um ajuste manual por parte do utilizador é a opção de excluir laminadoras do plano (Figura 23), ou seja, no caso de avaria ou ações de manutenção, pode ser útil não planear para uma determinada máquina, podendo assim, também, gerir o plano da retificadora.

LAMINADORA	ATIVA
Laminadora 12	Sim
Laminadora 8	Sim
Laminadora 1	Sim
Laminadora 3	Sim
Laminadora 7	Sim
Laminadora 13	Sim

Buttons: OK, Cancelar

Figura 23 – Userform para selecionar as laminadoras ativas.

De seguida, para que as operações sejam distribuídas pelos centros de trabalho respetivos, recorre-se ao botão “Correr Plano”. Uma vez que a maior parte das OFs iniciam a gama operatória pela operação de retificação, o sequenciamento é realizado a partir da retificadora, partindo depois para os postos seguintes. É também importante referir que o plano da retificadora parte com um turno de avanço, de forma a que seja possível dar resposta às necessidades das outras máquinas, e que, por questões de visibilidade, o *output* da aplicação consiste num plano para, aproximadamente, dois dias.

#### 4.3. Exemplo do Funcionamento do Algoritmo

A fim de explicar de forma mais perceptível todo o processo, será formulado um exemplo com valores meramente ilustrativos. Na Figura 24 está representado o separador com a gama operatória e OFs com as diversas particularidades que podem surgir todas as semanas. As colunas representadas correspondem, de forma respetiva, a:

- número da ordem de fabrico;
- referência do bloco;
- dimensão a retificar – corresponde ao *setup* da retificadora. Nos casos em que contém a expressão “Em Bruto”, os blocos não são retificados.
- As doze colunas seguintes são referentes à gama operatória (que apresenta, no máximo, quatro operações) e contêm, respetivamente, o posto da operação, o tempo de processamento (em horas) e a indicação de que a operação não foi concluída (através de “x”). Com o intuito de facilitar a análise da estrutura do produto por parte do utilizador, os diferentes postos de trabalho apresentam cores distintas (verde para retificadora, azul para as laminadoras, bege para a serra, cinzento para a laminadora-lixadora, laranja para lixadora e rosa para a embaladora).
- A coluna “Obs” diz respeito às observações, nomeadamente à falta de blocos para a realização da OF.
- Por fim, as colunas “QPER42” e “BL\_Disb” correspondem, respetivamente, ao número de blocos necessários para a realização da OF e ao número de blocos disponíveis dessa referência.

No caso de atraso ou prioridade, as primeiras três colunas são destacadas a vermelho ou amarelo (via formatação condicional) respetivamente. Já no caso de a OF estar concluída, toda a linha é destacada a verde.

OF	Bloco	Dimensão a Retificar	OP10	t1	E1	OP20	t2	E2	OP30	t3	E3	OP40	t4	E4	Obs	QPER42	BL_Dis
W77794	8002	915 mm x 610 mm	Ret	6,37		Serra	31,42		Lix CCS	13,62		Emb	6,50			50	60
W777348	8002	915 mm x 610 mm	Ret	2,00	x	Serra	6,86	x	Lix CCS	3,89	x	Emb	2,20	x		10	10
W778540	8003	Em Bruto (Medida Métrica)	Lam-Lix	1,50	x	Emb	1,68	x								30	37
W778541	8003	Em Bruto (Medida Métrica)	Lam-Lix	0,70	x	Emb	0,91	x								5	7
W778542	8003	900 mm x 600 mm	Ret	0,26	x	Lam	0,89	x	Emb	0,27	x					2	2
W774045	8004	Em Bruto (Medida Inglesa)	Lam 7	10,00	x	Emb	6,00	x								80	200
W774906	8004	Em Bruto (Medida Inglesa)	Lam 7	7,50	x	Emb	4,50	x								60	120
W777959	8004	915 mm x 610 mm	Ret	3,00	x	Lam	5,00	x	Emb	3,50	x					40	60
W778417	8004	915 mm x 610 mm	Ret	1,50	x	Lam	2,50	x	Emb	1,75	x					20	20
W778418	8026	Em Bruto (Medida Inglesa)	Lam	0,08		Emb	0,95	x								5	6
W779153	8026	Em Bruto (Medida Inglesa)	Lam 8	0,03	x	Emb	0,20	x								1	1
W778244	8403	900 mm x 600 mm	Ret	10,00	x	Lam	15,00	x	Emb	9,00	x					100	150
W777234	8403	900 mm x 600 mm	Ret	5,00	x	Lam	7,50	x	Emb	4,50	x					50	50
W777950	8403	900 mm x 600 mm	Ret	1,00	x	Lam	1,50	x	Emb	0,90	x				Falta Blocos	10	0
W778526	8403	915 mm x 610 mm	Ret	0,50	x	Lam	0,75	x	Emb	0,45	x				Falta Blocos	5	0
W778527	8512	915 mm x 610 mm	Ret	0,80	x	Lam	1,90	x								10	15
W778528	8512	915 mm x 610 mm	Ret	0,40	x	Lam 13	1,50	x								5	5
W778529	8749	Em Bruto (Medida Inglesa)	Lam 12	0,90	x	Emb	0,30	x								20	25
W778574	8749	950 mm x 650 mm	Ret	0,10	x	Lam 12	0,40	x	Emb	0,25	x					5	5
W778094	9426	Em Bruto (Medida Inglesa)	Lam 13	3,00	x											30	30

Figura 24 – Separador referente à gama operatória das OFs.

Analisando a Figura 24, temos então as seguintes particularidades:

- Uma OF já realizada;
- Duas OFs em atraso;
- Uma OF prioritária;
- Uma OF em que a primeira operação está concluída, pelo que essa não será planeada (ausência de “x” na coluna “E1”);
- Dois casos em que não existem blocos para a realização de OFs – estas duas não serão planeadas.

Correndo o programa, as primeiras operações das diversas gamas operatórias são escalonadas nos respetivos postos de trabalho, ou seja, observando a Figura 24, há oito OFs que não requerem retificação e doze em que essa operação é necessária.

O primeiro plano a ser analisado é o da retificadora (Figura 25), sendo que a cada posto de trabalho correspondem tabelas idênticas, com informações relevantes para os operadores como a identificação da OF e produto, tempos e operação seguinte.

OF	T_Total	Start	Tempo H266	T_Cum	Dimensão a Retificar	BL	Bloco	Blocos a Retificar	Blocos Acumulados	Due Date	Placa	Próxima OP
W778542	1,42	0,00	0,26	0,26	900 mm x 600 mm	BL1	8003	2	2	1	8002/00 915x610x9,8 mm	Laminadora
W777959	11,50	0,26	3,00	3,26	915 mm x 610 mm	BL3	8004	40	42	1	8002/00 1030x530x50,0 mm	Laminadora
W778417	5,75	3,26	1,50	4,76	915 mm x 610 mm	BL1	8004	20	62	5	8003/00 878x578x0,8 mm	Laminadora
W777348	14,95	4,76	2,00	6,76	915 mm x 610 mm	BL1	8002	10	72	5	8002/42 900x600x10,0 mm	Serra
W778528	1,90	6,76	0,40	7,16	915 mm x 610 mm	BL1	8512	5	77	5	8003/00 915x610x6,0 mm	Laminadora 13
W778527	2,70	7,16	0,80	7,96	915 mm x 610 mm	BL1	8512	10	87	5	8003/00 915x610x4,0 mm	Laminadora
W777234	19,00	7,96	6,50	14,46	900 mm x 600 mm	BL1	8403	50	137	5	8003/00 915x610x2,0 mm	Laminadora
W778244	34,00	14,46	10,00	24,46	900 mm x 600 mm	BL1	8403	100	237	5	8003/00 900x600x10,0 mm	Laminadora
W778574	0,75	24,46	0,10	24,56	950 mm x 650 mm	BL3	8749	5	242	5	8003/00 930x470x0,8 mm	Laminadora 12

Figura 25 – Plano da Retificadora.

Como pode ser visto na Figura 25, das doze OFs que necessitam da operação de retificação, apenas nove foram escalonadas, por motivos previamente referidos. O sequenciamento é, então, realizado tendo em conta a data de entrega – na coluna “Due Date” são atribuídos os valores 1, em caso de atraso, ou 5, caso contrário –, seguido do agrupamento por *setup* e tipo de bloco, sendo que, como último critério, é utilizada a regra SPT.

Considera-se que, ao longo da gama operatória, o momento em que uma operação termina (representado no plano como “T\_Cum”, isto é, tempo cumulativo) corresponde ao momento em que a seguinte pode ser iniciada. Como tal, foi acrescentada, nas tabelas referentes aos planos das máquinas que não a retificadora, a coluna de “Start Min” que corresponde ao momento em que a operação está pronta para ser realizada, isto é, corresponde ao momento em que a operação anterior termina. No caso de se

tratar da primeira operação da gama operatória ou a operação anterior tenha sido concluída antes de correr o programa, este valor será zero, o que significa que a operação está pronta a ser realizada.

Estando de acordo com a ordem definida, o plano estende-se para as máquinas seguintes, ou seja, Serra (Figura 26), Laminadora 12 (Figura 27), Laminadora 8 (Figura 28), Laminadoras 1 e 3 (Figura 29), Laminadora 7 (Figura 30), Laminadora 13 (Figura 31) Lixadora (Figura 32) e Embalagem (Figura 33).

OF	T_Total	OP	Start mín	Start	Tempo H264	T_cum	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Próxima OP	Esp
W777348	14,95	2	4,76	4,76	6,86	11,62	8002	1000	1000	8002/42 915x610x10,0 mm	Lix CCS	10,0

Figura 26 – Plano da Serra.

OF	T_Total	OP	Start Mín	Start	Tempo H263	T_Cum	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Esp	Próxima OP
W778529	3,95	1	0,00	0,00	0,90	0,90	8003	200	200	8749/00 940x640x20,0mm	20,0	Emb
W778574	1,42	2	23,06	23,06	0,40	23	8003	1250	1250	8749/00 950x650x0,8mm	0,8	Emb

Figura 27 – Plano da Laminadora 12.

OF	T_Total	OP	Start Mín	Start	Tempo H263	T_Cum	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Esp	Próxima OP
W779153	3,95	1	0,00	0,00	1,00	1,00	8003	250	250	8026/00 950x650x0,8 mm	0,8	Emb

Figura 28 – Plano da Laminadora 8.

OF	T_Total	OP	Start Mín	Start	Tempo H263	T_Cum	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Esp	Laminadora	Próxima OP
W778418	3,95	1	0,00	0,00	3,00	3,00	8026	100	100	8026/00 950x650x10,0mm	10,0	Laminadora 1	Emb
W778542	1,42	2	1,30	1,30	0,89	2,20	8003	50	50	8003/00 900x600x10,0mm	10,0	Laminadora 3	Emb
W777959	11,50	2	1,16	1,16	5,00	6,16	8004	11400	11400	8004/00 915x610x0,7mm	0,7	Laminadora 1	Emb
W778417	5,75	2	4,01	4,01	0,25	4,26	8003	250	250	8003/00 878x578x0,8 mm	0,8	Laminadora 3	Emb
W778527	2,70	2	7,96	7,96	1,90	9,86	8512	250	250	8512/00 915x610x8,0mm	8,0	Laminadora 3	
W777234	19,00	2	9,26	8,96	7,50	16,46	8403	1250	1250	8403/00 900x600x8,0mm	8,0	Laminadora 1	Emb
W778244	34,00	2	15,46	13,96	15,00	28,96	8403	2500	2500	8403/00 900x600x8,0mm	8,0	Laminadoras 1 e 3	Emb

Figura 29 – Plano das Laminadoras 1 e 3 (laminadoras *standard*).

No caso das laminadoras *standard*, uma vez que se trata de duas máquinas, o processo de escalonamento é alternado, isto é, a primeira laminadora a ser utilizada é, de forma predefinida, a 1. Caso uma operação esteja em espera e a Laminadora 1 ocupada, então a operação é alocada à Laminadora 3, sendo que o inverso também acontece. No caso de existir uma operação de laminação com tempo de processamento superior a 10 horas, esta é dividida pelas duas laminadoras de forma equivalente.



OF	T_Total	OP	Start Min	Start	Tempo H263	T_Cum	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Esp	Próxima OP
W774906	12,00	1	0,00	0,00	7,50	7,50	8004	1065	1065	8004/00 950x650x15,0 mm	15,0	Emb
W774045	16,00	1	0,00	7,50	10,00	17,50	8004	800	800	8004/00 950x650x15,0 mm	15,0	Emb

Figura 30 – Plano da Laminadora 7.

OF	T_Total	OP	Start Min	Start	Tempo H263	T_Cum	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Esp	Próxima OP
W778094	3,00	1	0,00	0,00	3,00	3,00	9426	2000	2000	9426/00 950x650x3,0mm	3,0	
W778528	1,90	2	7,56	7,56	1,50	9,06	8512	125	125	8512/00 915x610x5,0mm	5,0	

Figura 31 – Plano da Laminadora 13.

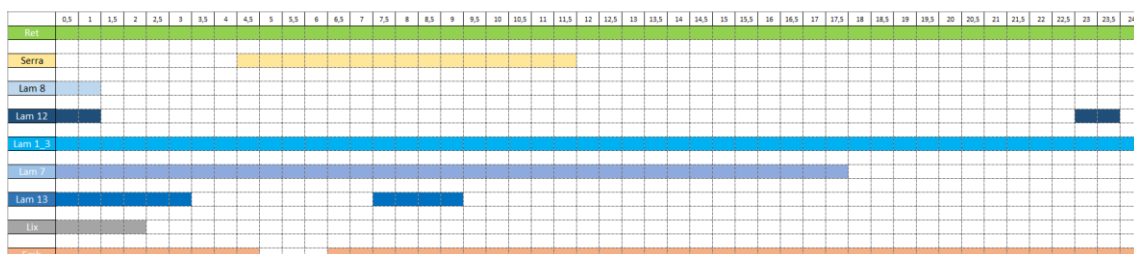
OF	T_Total	OP	Start min	Start	Tempo H265	T_Cum H265	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Espessura	Próxima OP
W778541	1,611	1	0,000	0,000	0,70	0,700	8002	525	525	8003/01 1030x530x2,0mm	3,0	Emb
W778540	3,182	1	0,000	0,700	1,50	2,200	8002	1050	1050	8003/01 1030x530x6,0mm	6,0	Emb

Figura 32 – Plano da Lixadora.

OF	T_Total	OP	Start min	Start	Tempo H268	T_Cum	Bloco	Qtd Placas Total	Qtd Placas Plan	Placa	Caixa	Qtd Caixas
W778418	3,95	2	0,00	0,00	0,95	0,95	8026	100	100	8026/00 950x650x10,0mm	-	-
W779153	1,20	2	1,00	1,00	0,20	1,20	8026	250	250	8026/00 950x650x0,8mm	-	-
W778541	1,61	2	0,70	1,20	0,91	2,11	8003	1050	1050	8003/01 1030x530x2,0mm	CX(H) 18783-N 925x625x300/320	8
W778529	1,20	2	0,90	2,11	0,30	2,41	8749	200	200	8749/00 940x640x20,0mm	Caixa cartãoCR 68220 935x635x300/320	1
W778542	1,42	3	2,20	2,41	0,27	2,68	8003	50	50	8003/00 900x600x10,0mm	CX(H) 18783-N 925x625x300/320	10
W778540	3,18	2	2,20	2,68	1,68	4,36	8003	525	525	8003/01 1030x530x6,0mm	CX(H) 18783-N 925x625x300/320	10
W777959	11,50	3	6,16	6,16	3,30	9,66	8004	11400	11400	8004/00 915x610x0,7mm	-	-
W774906	12,00	2	7,50	9,66	4,50	14,16	8004	1065	1065	8004/00 950x650x15,0mm	CX(A) 8503628 1035x535x200	44
W778417	5,75	3	4,26	14,16	1,75	15,91	8004	5700	5700	8004/00 915x610x0,7mm	-	-
W777348	14,95	4	12,75	15,91	2,20	18,11	8002	1000	1000	8002/42 915x610x10,0 mm	CX(E) 69082 930x630x165	144
W774045	16,00	2	17,50	18,11	6,00	24,11	8004	800	800	8004/00 950x650x15,0mm	CX(A) 8503628 1035x535x200	220
W777234	19,00	3	16,46	24,11	4,50	28,61	8403	1250	1250	8403/00 900x600x8,0mm	CX(H) 18783-N 925x625x300/320	2
W778244	34,00	3	28,96	28,96	9,00	37,96	8403	2500	2500	8403/00 900x600x8,0mm	CX(H) 18783-N 925x625x300/320	10
W778574	0,75	3	23,46	37,96	0,25	38,21	8749	1250	1250	8749/00 950x650x0,8mm	CX(E) 71120 1035x535x300/325	81

Figura 33 – Plano da Embaladora.

Concluído o planeamento das OFs, a partir do escalonamento das operações pelas máquinas, procede-se à análise da ocupação dos equipamentos através de um diagrama de *Gantt* preenchido de forma automática no fim do programa (Figura 34). Dada a grande variabilidade da duração das OFs nesta linha, desde cerca de dois minutos a quarenta horas, o diagrama não foi concebido com o intuito de analisar o sequenciamento, mas sim a ocupação dos equipamentos.

Figura 34 – Diagrama de *Gantt* correspondente à ocupação dos equipamentos.

No diagrama estão representadas as ocupações das máquinas através das cores atribuídas às mesmas nos cabeçalhos das tabelas correspondentes aos planos (Figuras 25 a 33). De cima para baixo, estão representadas as ocupações da Retificadora, Serra,



Laminadora 12, Laminadora 8, Laminadoras 1 e 3, Laminadora 7, Laminadora 13, Lixadora e Embaladora. Cada unidade temporal (representada no diagrama através de pequenos retângulos) corresponde a trinta minutos, sendo que, na Figura 34, estão demonstradas as ocupações para as primeiras vinte e quatro horas.

Caso se conclua que não há um balanceamento entre as laminadoras e que esta disparidade condiciona o tempo de conclusão de algumas OFs (olhando, para além da ocupação das laminadoras, para os tempos de inatividade do posto de embalagem), o utilizador pode recorrer ao botão “Distribuir OFs por Laminadoras”, representado na Figura 19, de forma a que o programa verifique se é possível transferir OFs das laminadoras *standard* para outras laminadoras, nomeadamente a 8 e a 12.

A utilização da ferramenta termina com a criação de PDFs e impressão das tabelas (devido ao facto de nem todos os postos de trabalho possuírem computador) através do botão no menu inicial (Figura 19) e distribuição pelos diferentes postos.

#### 4.4. Comparação de Métodos

Com o intuito de comparar o processo anterior com aquele que é realizado através da utilização da ferramenta, foi feito um acompanhamento intensivo durante, sensivelmente, uma semana na linha de produção (Tabela 9). Este acompanhamento incidiu em dois turnos diários. As métricas analisadas neste estudo foram:

- Tempo de execução do planeamento;
- Tempo perdido na alocação de OFs no *software* das laminadoras;
- Número de gamas operatórias incorretas detetadas;
- Número de OFs em atraso.

Tabela 9 – Comparação entre o processo de planeamento manual e o processo com utilização da ferramenta desenvolvida.

	Total		Média Diária	
	Método Anterior	Ferramenta	Método Anterior	Ferramenta
Tempo execução do planeamento [min]	104	71	20,8	14,2
Tempo alocação de OFs às laminadoras [min]	79	15	15,8	3
Nº gamas operatórias corrigidas	0	8	0	1,8
Nº de OFs em atraso	4	2	-	-

Fruto do facto de se tratar de uma amostra temporal algo reduzida, não foi possível apresentar uma comparação relevante no que toca ao escalonamento face ao método utilizado pela empresa. No entanto, em termos de tempos até então despendidos para a realização do planeamento e todas as tarefas que ao mesmo dizem respeito, foram visíveis algumas melhorias, na medida em que a carga do supervisor da área diminuiu e foram ainda corrigidas estruturas de produtos desatualizadas.

Relativamente ao tempo de execução do planeamento diário propriamente dito, com a utilização da ferramenta de apoio à decisão, houve um decréscimo médio diário de, aproximadamente 32% (6,6 minutos).

Já no tempo de alocação de OFs às laminadoras, notou-se uma maior diferença, pois para além do planeamento, o supervisor altera, numa base diária, a alocação de laminadoras a determinadas OFs através da utilização de um *software* específico. Neste campo, houve uma redução média de 81%, que equivale a 12,8 minutos por dia.

Por outro lado, foram corrigidas 8 gamas operatórias que provocavam erros nas capacidades dos diferentes equipamentos.

Por fim, comparando o número de OFs em atraso, viu-se uma diferença de duas OFs favoráveis ao método baseado na utilização da ferramenta de apoio à decisão. No entanto, dada a variabilidade da carteira semanal, conclui-se que este dado apresenta uma menor relevância para o estudo.

# CONCLUSÕES

- 5.1. CONCLUSÕES
- 5.2. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. CONCLUSÕES

Na área das Operações, o planeamento da produção é uma atividade que deve ser aprimorada de forma a que os prazos estabelecidos possam ser cumpridos. Para tal, nem sempre é necessário um investimento avultado, pelo que é possível obter melhorias significativas com implementações de baixo custo. No entanto, existem determinados sistemas que requerem metodologias mais complexas, como é o caso do problema *job-shop*.

Os objetivos estipulados no início da presente dissertação foram parcialmente cumpridos, na medida em que, apesar de ter sido desenvolvida uma ferramenta de apoio à decisão ao planeamento da produção com a possibilidade de ajuste de parâmetros relevantes ao processo por parte do utilizador, não foi possível retirar conclusões decisivas no que à qualidade do sequenciamento diz respeito. A ferramenta carece também de *Key Performance Indicators* (KPIs) que possibilitem uma análise mais precisa do sequenciamento.

Relativamente ao mapeamento do processo realizado na fase inicial do projeto, foi possível fazer o levantamento de estruturas de produto e tempos desatualizados e/ou incorretos no ERP da empresa. Este levantamento conduziu, naturalmente, à correção dos dados, algo que contribuiu não só para um planeamento da produção mais sólido, uma vez que o mesmo é realizado com base nas ocupações dos equipamentos, como também para a passagem de informação mais fidedigna para a produção.

Verificaram-se potenciais ganhos imediatos no que toca aos tempos previamente alocados à realização do planeamento, onde houve uma redução média de cerca de 32%, e algumas tarefas inerentes, como o ajuste realizado no *software* das laminadoras, onde houve um decréscimo médio de, aproximadamente, 81%.

A automatização do processo de planeamento promoveu também a deteção e respetiva correção de gamas operatórias desatualizadas e/ou incorretas no ERP, através da definição de padrões no que toca à alocação de equipamentos a determinadas referências. O facto de a ferramenta poder ser utilizada tanto pelo planeador como pelo supervisor, resulta numa maior coordenação entre as respetivas áreas.

De modo a tornar a ferramenta de apoio à decisão mais flexível, foram adicionados comandos que permitem ao utilizador, não só controlar aquilo que quer planear (através

da opção de controlo do número de blocos disponíveis), como também seleccionar equipamentos disponíveis.

Em suma, o estudo prévio de vários cenários antes da tomada de decisão pode ajudar uma organização a tomar decisões mais pragmáticas em função da sua necessidade. Estes estudos visam um aumento da eficiência da produção, obtendo ganhos significativos, tais como a satisfação dos clientes, a diminuição de custos de não produção e o consequente aumento da competitividade no mercado.

## 5.2. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

No âmbito da continuação do projeto na empresa, devem ser destacados os seguintes tópicos relativos à ferramenta de apoio à decisão desenvolvida:

- Validação e implementação da ferramenta de apoio à decisão como instrumento de base para o sistema de planeamento;
- Criação e cálculo automático de outros *Key Performance Indicators* (KPIs);
- Padronizar e, numa fase posterior, replicar este tipo de ferramenta para outras linhas de produção de complexidade semelhante na fábrica.

# **BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO**



## 6. BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Adams, J., Balas, E., & Zawack, D. (1988). The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling. *Management Science*, 34(3), 391–401. <https://doi.org/10.1287/mnsc.34.3.391>
- Ávila, P., & Cavaco, I. (2008). Capítulo II - Planeamento Programação e Controlo da Produção com MRP. In *Planeamento Programação e Controlo da Produção com MRP*.
- Baker, K. R., & Bertrand, J. W. M. (1982). A dynamic priority rule for scheduling against due-dates. *Journal of Operations Management*, 3(1), 37–42. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(82\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0272-6963(82)90020-1)
- Baker, K. R., & Trietsch, D. (2009). *Principles of Sequencing and Scheduling*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470451793>
- Balas, E., Lenstra, J. K., & Vazacopoulos, A. (1995). The One-Machine Problem with Delayed Precedence Constraints and its Use in Job Shop Scheduling. *Management Science*, 41(1), 94–109. <https://doi.org/10.1287/mnsc.41.1.94>
- Bierwirth, C. (1995). A generalized permutation approach to job shop scheduling with genetic algorithms. *OR Spektrum*, 17(2–3), 87–92. <https://doi.org/10.1007/BF01719250>
- Błażewicz, J., Ecker, K. H., Pesch, E., Schmidt, G., & Węglarz, J. (2001). *Scheduling computer and manufacturing processes*. Springer.
- Chen, B., & Matis, T. I. (2013). A flexible dispatching rule for minimizing tardiness in job shop scheduling. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 360–365. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2012.08.019>
- Cheng, R., Gen, M., & Tsujimura, Y. (1996). A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms—I. representation. *Computers & Industrial Engineering*, 30(4), 983–997. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(96\)00047-2](https://doi.org/10.1016/0360-8352(96)00047-2)
- Dell’Amico, M., & Trubian, M. (1993). Applying tabu search to the job-shop scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 41(3), 231–252. <https://doi.org/10.1007/BF02023076>
- Garey, M. R., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117–129. <https://doi.org/10.1287/moor.1.2.117>
- Gere, W. S. (1966). Heuristics in Job Shop Scheduling. *Management Science*, 13(3), 167–190. <https://doi.org/10.1287/mnsc.13.3.167>
- Giffler, B., & Thompson, G. L. (1960). Algorithms for Solving Production-Scheduling Problems. *Operations Research*. INFORMS. <https://doi.org/10.2307/167291>
- Haupt, R. (1989). A survey of priority rule-based scheduling. *OR Spektrum*, 11(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/BF01721162>
- JACKSON, J. R. (1955). SCHEDULING A PRODUCTION LINE TO MINIMIZE MAXIMUM TARDINESS. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/docs/citations/AD0152722>
- Lopez, P., & Roubellat, F. (2008). *Production scheduling*. ISTE. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Production+Scheduling-p-9781848210172>
- Pereira, A. M. (2003). *Aplicação de Meta-Heurísticas ao Problema de Escalonamento em Ambiente Dinâmico de Produção Discreta*.
- Pinedo, M. (2008). *Scheduling : theory, algorithms, and systems*. Springer. Retrieved from [https://books.google.pt/books/about/Scheduling.html?id=EkpDak9kEs0C&redir\\_esc=y](https://books.google.pt/books/about/Scheduling.html?id=EkpDak9kEs0C&redir_esc=y)
- Pinedo, M., & Hadavi, K. (1992). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*



- Development. In *Operations Research Proceedings 1991* (pp. 35–42). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-46773-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46773-8_5)
- Qiu, X., & Lau, H. Y. K. (2013). An AIS-based hybrid algorithm with PDRs for multi-objective dynamic online job shop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 13(3), 1340–1351. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2012.07.033>
- Ramasesh, R. (1990). Dynamic job shop scheduling: A survey of simulation research. *Omega*, 18(1), 43–57. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(90\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0305-0483(90)90017-4)
- Reis, J. (2006). Uma introdução ao scheduling. Retrieved from <https://repositorio.iscte-iul.pt/handle/10071/169>
- Rinnooy Kan, A. H. G. (1976). *Machine scheduling problems : classification, complexity and computations*. Stenfert Kroese. Retrieved from [https://books.google.pt/books/about/Machine\\_Scheduling\\_Problems.html?id=1eLbAAAAMAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.pt/books/about/Machine_Scheduling_Problems.html?id=1eLbAAAAMAAJ&redir_esc=y)
- Shakhlevich, N. V., Sotskov, Y. N., & Werner, F. (2000). Complexity of mixed shop scheduling problems: A survey. *European Journal of Operational Research*, 120(2), 343–351. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00161-7)
- Silva, S. C. (1994). *Organização e Gestão da Produção*.
- Smith, W. E. (1956). Various optimizers for single-stage production. *Naval Research Logistics Quarterly*, 3(1–2), 59–66. <https://doi.org/10.1002/nav.3800030106>
- Tay, J. C., & Ho, N. B. (2008). Evolving dispatching rules using genetic programming for solving multi-objective flexible job-shop problems. *Computers & Industrial Engineering*, 54(3), 453–473. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2007.08.008>
- van Laarhoven, P. J. M., Aarts, E. H. L., & Lenstra, J. K. (1992). Job Shop Scheduling by Simulated Annealing. *Operations Research*, 40(1), 113–125. <https://doi.org/10.1287/opre.40.1.113>